

STROBOSKOPINIO OSCILOSKOPO LAIKO KANALO TRIUKŠMO MAŽINIMO BŪDAS

Tomaš TANKELIUN¹, Oleg ZAYTSEV², Vytautas URBANAVIČIUS³

^{1,3}Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

²UAB ELTESTA, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹tomas.tankeliun@vgtu.lt; ²zaytsev@eltesta.com; ³vytautas.urbanavicius@vgtu.lt

Santrauka. Stroboskopiniame osciloskope išmatuoto signalo rekonstrukciją iš jo imčių – jų išdėstymą laiko skalėje – vykdo specialus skaitmeninis įtaisas. Šiuo atveju kiekvienai imčiai, be išmatuotos įtampos vertės, skaitmeninis įtaisas nustato tam tikrą vėlinimą (synchronizacijos įvykio – vaizduojamo ekrane signalo pradžios atžvilgiu), kurį formuoja stroboskopinio osciloskopo laiko kanalas. Norint išmatuoti signalą kelių dešimčių femto sekundžių raiška, stroboskopinio osciloskopo laiko kanalas minėtus vėlinimus privalo formuoti labai tiksliai. Tačiau praktikoje tai padaryti labai sudėtinga. Laiko kanalo grandis yra jautri valdymo signalų ir maitinimo triukšmams, todėl rekonstruojame signalą pasireiškia kaip sukeliamas išmatuotų imčių fazės triukšmas. Straipsnyje nagrinėjamas stroboskopinio osciloskopo alternatyviojo laiko kanalo įgyvendinimo būdas, kurio išmatuotų imčių laiko skalėje rekonstravimo tikslumas priklauso tik nuo paties stroboskopinio osciloskopo įtampos matavimo (t. y. vertikalios Y kanalo) tikslumo. Siūlomo precizinio laiko kanalo sandara leidžia kelis kartus sumažinti, lyginant su įprastu kanalu, sukuriama fazės imčių triukšmą.

Reikšminiai žodžiai: stroboskopinis osciloskopas, fazės triukšmas, amplitudės triukšmas, hibridinis laiko kanalas, atsitiktinis strobavimas, rekonstrukcijos metodas pagal harmoninį virpesį.

Įvadas

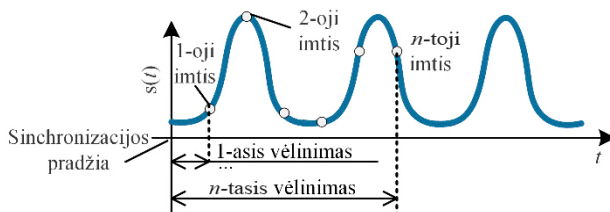
Stroboskopiniame osciloskope matuojamo signalo forma rekonstruojama iš diskrečių imčių tiksliai valdomais suvėlintais signalo pradžios atžvilgiu laiko momentais (1 pav.). Šiuos tikslus, iki femto sekundžių (10^{-15} s) eilės, vėlinimus formuoja osciloskopo laiko kanalas (Nader *et al.* 2013; Hale *et al.* 2007; Grove 1966). Formuojami vėlinimai taip pat skirti matuojamo signalo strobavimo procesui tiksliai sinchronizuoti. Siekiant įgyvendinti tokią tikslią sinchronizaciją osciloskopui reikalinga precizinė sinchronizacijos grandinė (Hale *et al.* 2006).

Vėlinimo formavimo ir sinchronizacijos grandinės šiuolaikiniuose osciloskopuose sudaro gana sudėtingą įtaisą, kuris yra labai imlus išorinių elektromagnetinių

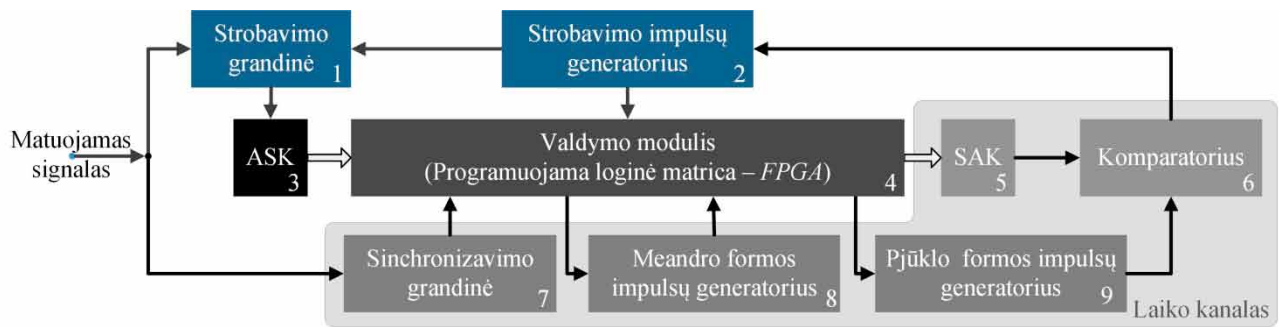
trūkščių įtakai, vidinių komponentų parametrų sklaidai ir išorinės temperatūros pokyčiams (Luscher 1968). Darbe sprendžiama stroboskopinių osciloskopų praleidžiamųjų dažnių juostos praplatinimo problema atskleidžiant įprasto laiko kanalo netobulumus ir ieškant būdų, kaip jų išvengti.

Stroboskopinio osciloskopo laiko kanalo tikslumo didinimas praktikoje gali būti pasiektas dviem būdais: tobulinant laiko kanalo schemą arba kompensuojant esamo laiko kanalo triukšmus pritaikius skaitmeninius matavimo rezultatų korekcijos metodus (Wang *et al.* 2002; Nelson 2000).

Pagal Yuan *et al.* (2013), stroboskopinio osciloskopo įprasto laiko kanalo matavimo neapibrėžties šaltiniai yra trijų tipų: imčių fazės triukšmas, viso matuojamo signalo įrašo dreifas laike ir netiesiniai iškreipimai. Kiekvienam iš paminėtų tipų Yuan *et al.* (2013) taiko specialius matavimo klaidos kompensavimo algoritmus (Wang, Hale 2012; Blair 1998). Pagrindinis tokių algoritmų taikymo trūkumas – padidėjusi signalo matavimo trukmė. Pvz., norint kompensuoti laiko kanalo netiesinius iškreipimus, prieš pradėdamat matuoti dominantį signalą, atliekami papildomi laiko kanalo charakteristikų matavimai, t. y. kanalas kalibruojamas. Imčių fazės triukšmui kompensuoti reikalingas



1 pav. Matuojamo signalo formos rekonstravimo iliustracija
Fig. 1. Reconstruction operation of the measured signal



2 pav. Įprasto stroboskopinio osciloskopo laiko kanalo struktūrinė schema
 Fig. 2. Simplified schematic diagram of the standard time-base of sampling oscilloscope

didelis skaičius pakartotinai išmatuotų signalo įrašų, tačiau ilgai matuojant signalą pasireškia įrašo temperatūrinis dreifas, kuris neigiamai veikia pačios imčių fazės triukšmo kompensavimo procedūros efektyvumą (Yuan *et al.* 2013).

Schemotechninio pobūdžio laiko kanalo tobulinimai taip pat gali būti skirstomi į du tipus: įprasto laiko kanalo (jo bendroji sandara aptariama kitame skyriuje) atskirų įtaisų tobulinimas arba viso laiko kanalo sandaros keitimas.

Darbo tikslas – sukurti viso precizinio laiko kanalo (toliau vadinsime hibridiniu laiko kanalu) sandarą, kuri leistų praplėsti stroboskopinio osciloskopo signalų laikinių parametrų matavimo charakteristikas.

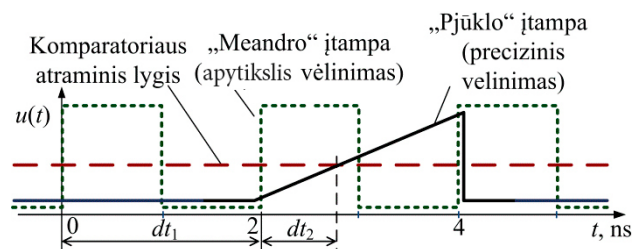
Straipsnio struktūra tokia: pradžioje pateiktas įprasto stroboskopinio osciloskopo laiko kanalo veikimo principas, aptariami galimi laiko kanalo tikslumo didinimo būdai, siūloma nauja hibridinio laiko kanalo sandara, nagrinėjamos pasiūlyto laiko kanalo darbinės charakteristikos, pabaigoje daromos išvados apie laiko kanalo pasiūlytos sandaros efektyvumą ir taikymo galimybes.

Įprasto stroboskopinio osciloskopo laiko kanalo veikimo principas

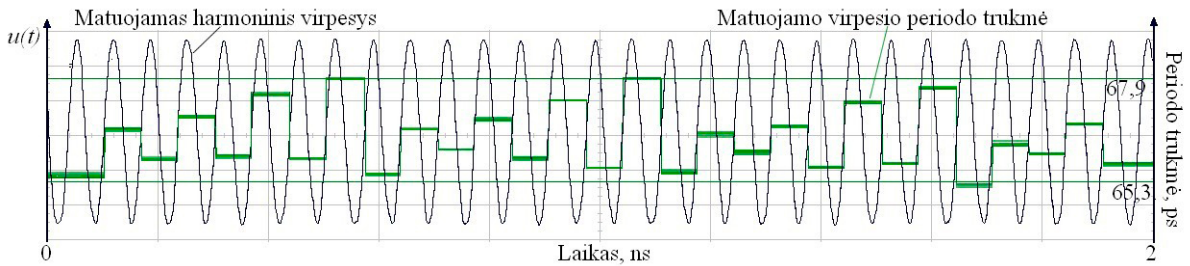
Įprastas stroboskopinio osciloskopo laiko kanalas (2 pav.) turi formuoti precizinius vėlinimus tarp matuojamo signalo synchronizacijos įvykio (matavimo procedūros pradžios) ir strobavimo impulsų generavimo. Įprastame laiko kanale toks vėlinimas formuojamas nuosekliai dviem etapais. Pirmuoju etapu osciloskopo įėjime atsiradus matuojamam signalui synchronizavimo ir valdomo generatoriaus grandinės (2 pav., 7 ir 8 blokai) formuoja stačiakampį, meandro formos synchronizacijos impulsą, kurio trukmė dažniausiai yra santykinai didelė – nanosekundžių (10^{-9} s) eilės. Valdomas meandro formos impulsų generatorius įgyvendintas loginio rakto pagrindu, o jo generuojamo impulso trukmė yra fiksuota ir nustatoma parenkant pagėidaujamo vėlinimo liniją tarp loginio elemento išėjimo ir įėjimo. Skaičiuojant šios meandro formos impulsus,

programuojamos loginės matricos (angl. *field programmable gates array – FPGA*) valdymo modulis (2 pav., 4 blokas) formuoja „apytikslio diskretiškumo“ vėlinimus. Šių vėlinimų žingsnis (diskretiškumas) yra apribotas *FPGA* veikimo sparta.

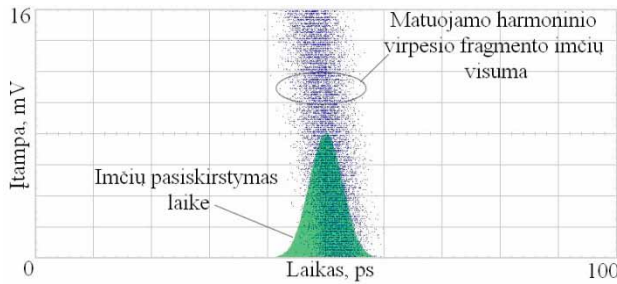
Antruoju etapu, suskaičiavus *FPGA* valdymo modulio skaitmeniniame skaitiklyje reikiamą impulsų skaičių (apytikslis vėlinimas, 3 pav., dt_1), paleidžiamas pjūklo formos impulsų generatorius (2 pav., 9 blokas), kurio signalą komparatorius (2 pav., 6 blokas) lygina su iš anksto nustatytu atraminio įtampos lygiu (3 pav.). Atitinkamai nustačius atraminės įtampos lygį (taikant didelio skilčių skaičiaus skaitmeninį analoginį keitiklį (SAK) (2 pav., 5 blokas), formuojamas preciziškas vėlinimas (3 pav., dt_2), tačiau jo maksimali trukmė negali viršyti anksčiau minėto meandro formos impulso periodo trukmės. Taigi synchronizacijos įvykio atžvilgiu komparatoriaus išėjime formuojamas atitinkamai užvėlintas valdymo signalas, paleidžiantis strobavimo impulsų generatorių (2 pav., 1 blokas). Taigi galutinis vėlinimas yra minėtų dviejų vėlinimų – apytikslis (kartotinis valdomo meandro formos generatoriaus impulso periodui) ir precizinio (priklausomas nuo komparatoriaus įėjime nustatyto atraminio lygio) – suma (3 pav., $dt_1 + dt_2$). Įprastame laiko kanale formuojamo vėlinimo tikslumas yra atvirkščiai proporcingas šio vėlinimo trukmei, nes kiekviena sumuojama meandro formos impulso periodo trukmė ir pjūklo formos impulso atkarpa lemia tam tikrą neapibrėžtį.



3 pav. Įprasto laiko kanalo generuojami valdymo signalai
 Fig. 3. The control signals of time-base channel



4 pav. Laiko kanalo netiesinių iškreipimų matavimo iliustracija
Fig. 4. Illustration of nonlinear distortion time of time-base channel



5 pav. Laiko kanalo imčių fazės triukšmo matavimo iliustracija
Fig. 5. Illustration of jitter measurements of time-base channel

Vėlinimai, formuojami aptartame įprastame laiko kanale, pasižymi netiesiniais iškreipiais, atsiradusiais dėl pjūklo formos impulso netiesiškumo. Pvz., 4 pav. matyti, kad dėl netiesinių iškreipimų kiekvieno išmatuoto 15 GHz harmoninio virpesio periodo trukmė yra skirtinga (čia horizontalūs brūkšniai žymi harmoninio virpesio atitinkamo periodo trukmę). Didžiausias matuojamo virpesio periodų skirtumas šiuo atveju siekia $67,9 - 65,3 = 2,6$ ps (t. y. $\sim 4\%$).

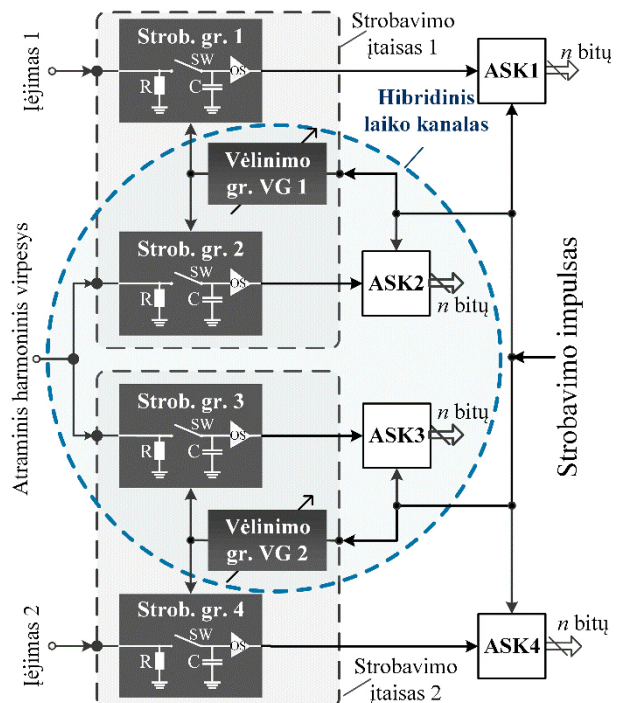
Be netiesinių iškreipimų įprastas stroboskopinio osciloskopo laiko kanalas yra jautrus išoriniams įtampų triukšmams. Šiuo atveju formuojami vėlinimai tampa nestabilūs, dėl to rekonstruotame išmatuotame signale atsiranda fazės imčių triukšmas (5 pav.). Jis didėja ilgėjant formuojamų vėlinimų trukmėms.

Hibridinio laiko kanalo sandara

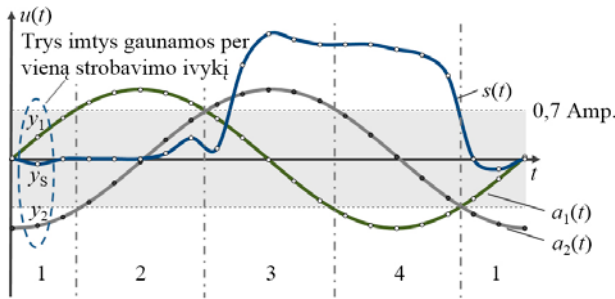
Kai kurių elektroninių sistemų, tarkime, ryšio ar kompiuterinių, veikimas sinchronizuojamas jų vidiniu generatoriumi. Jeigu šio vidinio sinchroninio generatoriaus virpesiai yra harmoniniai (pavadinkime juos atraminiais virpesiais), o pats generatorius turi išorinę jungtį šiems virpesiams kontroliuoti, tuomet minėtų sistemų charakteristikoms matuoti gali būti pritaikytas stroboskopinis osciloskopas, kuriame įgyvendintas siūlomas hibridinis laiko kanalas. Laiko kanale minėtas harmoninis virpesys naudojamas kaip atraminis, kuris reikalingas matuojamo signalo rekonstrukcijai. Tokio hibridinio laiko kanalo pagrindinis privalumas,

lyginant su įprastu – matuojamo signalo imtyse kelis kartus mažesnis sukeliamas fazės triukšmas.

Įgyvendinant hibridinį laiko kanalą bus atsisakyta visų stroboskopinio osciloskopo įprasto (2 pav.) laiko kanalo įtaisų. Siūloma naudoti keturių kanalų stroboskopinį osciloskopą, kuriame du Y kanalai yra rezervuojami hibridiniam laiko kanalui įgyvendinti, o likusieji – išsaugo savo įprastą (signalų matavimo) paskirtį. Hibridinį laiko kanalą (6 pav.) sudaro dvi matuojamo signalo strobavimo grandinės (Strob. gr. 2 ir Strob. gr. 3), dvi strobavimo impulso kintamo vėlinimo grandinės VG1 bei VG2 ir du analoginiai skaitmeniniai keitikliai ASK2 ir ASK3. Pažymėtina, kad osciloskope strobavimo grandinių poros (atitinkamai Strob. gr. 1 ir 2, Strob. gr. 3 ir 4) fiziškai yra įgyvendintos kaip vienas dvikanalis strobavimo įtaisas.



6 pav. Hibridinio laiko kanalo struktūrinė schema
Fig. 6. Block diagram of hybrid time-base channel



7 pav. Matuojamo impulsinio signalo $s(t)$ ir atraminių harmoninių $a_1(t)$, $a_2(t)$ virpesių laiko diagrama

Fig. 7. Timing diagrams of measured signal $s(t)$ and two reference oscillations $a_1(t)$, $a_2(t)$

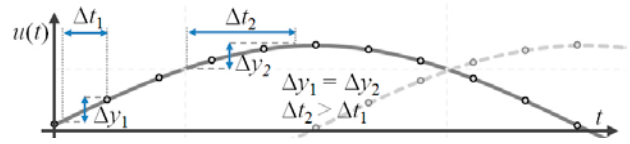
Tokiame keturių kanalų stroboskopiniame osciloskope matuojamo signalo strobavimas vyksta asinchroniškai, nes atsisakyta sinchronizacijos grandinės kaip pagrindinio laiko kanalo triukšmo šaltinio. Šiuo atveju atsitiktiniu būdu matuojamo, t. y. asinchroniškai strobuoto, signalo formos rekonstravimo procedūra vykdoma atsižvelgiant į atraminį harmoninį virpesį, kuris nagrinėjamu atveju yra griežtai sinfaziškas matuojamam signalui. Taip pat pažymėtina, kad osciloskopo ekrane šiuo atveju vaizduojamas laiko „langas“ atitinka vieną atraminio harmoninio virpesio periodą T .

Atraminis harmoninis virpesys vienu metu siunčiamas iškart į du osciloskopo kanalus (6 pav. Strob. gr. 2 ir Strob. gr. 3) ir juose matuojamas kaip įprastas signalas. Matuojant vėlinimo grandinės (6 pav. VG1 ir VG2) suderintos taip, kad fazių skirtumas tarp šių kanalų nuolat palaikomas lygus $\pi / 2$. Taigi kiekvienu laiko momentu egzistuoja dviejų pagalbinių taškų pora: y_1 – atraminio harmoninio virpesio imties įtampos vertė ir y_2 – uždelsto $\pi / 2$ harmoninio virpesio imties įtampos vertė, kurių padėtys laiko ašyje (fazė φ vieno periodo atkarpoje) gali būti vienareikšmiškai nustatytos pagal tokią išraišką:

$$\varphi = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{y_1}{A_1}\right) & , \text{ kai } y_2 \geq 0 \\ \cos^{-1}\left(\frac{y_1}{A_1}\right) + \pi & , \text{ kai } y_2 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

čia A_1 – pirmojo atraminio harmoninio virpesio amplitudė, kuri nustatoma iš y_1 imčių aibės taikant histogramos matavimo metodą, o keitiklių ASK2 ir ASK3 atitinkamai matuojamos y_1 ir y_2 imčių vertės.

Visų trijų signalų – matuojamo $s(t)$, atraminio harmoninio virpesio $a_1(t)$ ir uždelsto atraminio virpesio $a_2(t)$ – imties gaunamos per vieną strobavimo įvykį ne tuo pačiu laiko momentu (7 pav.). Jeigu atraminiai virpesiai nėra paveikti išorinių trukdžių, tai remiantis jų imčių vertėmis ir pritaikius (1) išraišką galima apskaičiuoti matuojamo signalo imties



8 pav. Fazės triukšmo Δt_i , esant vienodam ($\Delta y_1 = \Delta y_2$) amplitudės triukšmui, iliustracija

Fig. 8. Illustration of phase jitters Δt_i at the same amplitude noise ($\Delta y_1 = \Delta y_2$)

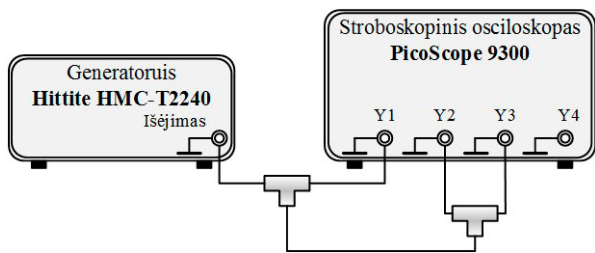
padėtį kampo φ dydžiu laiko „lange“ atsižvelgiant į atraminio virpesio periodą. Apskaičiuotos padėties neapibrėžtis šiuo atveju daugiausia priklausys nuo ASK2 ir ASK3 (6 pav.) skilčių skaičiaus.

Realioje sistemoje atraminiai harmoniniai virpesiai nėra idealūs – visada yra iškraipyti. Priklausomai nuo atraminio virpesio statumo pasirinktame taške, ši virpesių veikiančio stacionaraus atsitiktinio amplitudės triukšmo projekcija laiko ašyje atitinka skirtingą fazės triukšmą (8 pav.). Tarkime, to paties dydžio amplitudės triukšmas ($\Delta y_1 = \Delta y_2$) statesniame harmoninio virpesio šlaite atitinka mažesnę fazės triukšmą negu nuožulniame šlaite (8 pav., $\Delta t_1 < \Delta t_2$). Nuosekliai rekonstruojant matuojamo signalo taškų padėtį laiko ašyje, tarkime, kai atraminio virpesio $a_1(t)$ momentinė vertė viršija, pvz., $0,7A_1$ lygį, rekonstravimo procedūra toliau vyksta persijungiant į uždelstą atraminį virpesį $a_2(t)$, ir atvirkščiai. Taip stengiamasi išnaudoti stačiausias atraminių virpesių vietas. Taigi hibridiniame laiko kanale laiko bazė sudaroma iš keturių dalių (7 pav.), t. y. sujungiamą iš keturių $\pi/2$ laiko atkarpų. Pažymėtina, kad paklaidos, atsirandančios šių atkarpų sujungimo vietose, priklauso nuo valdomo fazių skirtumo tarp atraminių virpesių nustatymo tikslumo. Šiuo atveju (1) išraiška įgyja tokį pavidalą:

$$\varphi = \begin{cases} \cos^{-1}\left(-\frac{y_2}{A_2}\right) & , \text{ kai } y_1 > 0, |y_2| \leq 0,7A_2 \\ \cos^{-1}\left(\frac{y_1}{A_1}\right) + \frac{\pi}{4} & , \text{ kai } y_2 > 0, |y_1| \leq 0,7A_1 \\ \cos^{-1}\left(\frac{y_2}{A_2}\right) + \frac{\pi}{2} & , \text{ kai } y_1 \leq 0, |y_2| \leq 0,7A_2 \\ \cos^{-1}\left(-\frac{y_1}{A_1}\right) + \frac{3\pi}{4} & , \text{ kai } y_2 \leq 0, |y_1| \leq 0,7A_1 \end{cases} \quad (2)$$

Hibridinio laiko kanalo tyrimas

Siūlomo hibridinio laiko kanalo eksperimentinio tyrimo schema pateikta 9 pav. Siekiant nustatyti siūlomo hibridinio laiko kanalo fazės triukšmo dydį ir vizualiai parodyti jo įtaką matuojamam signalui, į stroboskopinio osciloskopo PicoScope 9300 Y1 kanalą iš generatoriaus Hittite



9 pav. Hibridinio laiko kanalo eksperimentinio tyrimo schema
Fig. 9. A scheme for the experimental study of the hybrid time-base channel

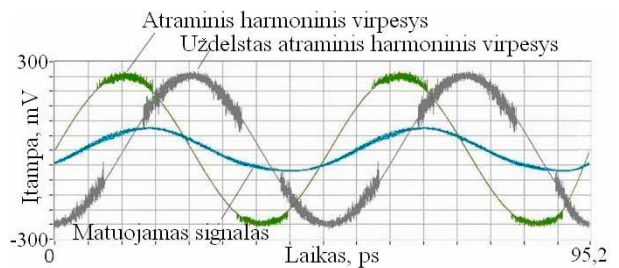
HMC-T2240 išėjimo buvo siunčiamas 21 GHz dažnio ir 1 V amplitudės harmoninis virpesys (šiuo atveju kaip matuojamas signalas). Atraminiai harmoniniai virpesiai šiuo atveju buvo gauti jungiant vieną trišakį į matuojamo signalo kabelį, o per kitą trišakį sujungus osciloskopo Y2 ir Y3 kanalus (9 pav.). Osciloskopo Y4 kanalas šiuose tyrimuose liko neišnaudotas. Matuojamo signalo imčių fazinė padėtis atraminio signalo periodo atžvilgiu buvo nustatoma pagal (2) išraišką atitinkamai pakeitus *PicoScope* 9300 osciloskopo naudotojo sąsajos programinę įrangą.

Buvo minėta, kad siūlomas hibridinis laiko kanalas formuoja fiksuotos trukmės matavimo laiko ašį (kitai – matavimo „langą“). Matavimo „lango“ plotis šiuo atveju yra pastovus ir lygus atraminio harmoninio virpesio periodui T . Norint matyti daugiau matuojamo signalo periodų osciloskopo ekrane, išmatuotas periodas (originalus vaizdas) rekonstravimo etapu tiesiog kartojamas. Pvz., 10 pav. vaizduojamo signalo, rekonstruoto hibridinio laiko kanalo, antras periodas yra pirmo periodo kopija.

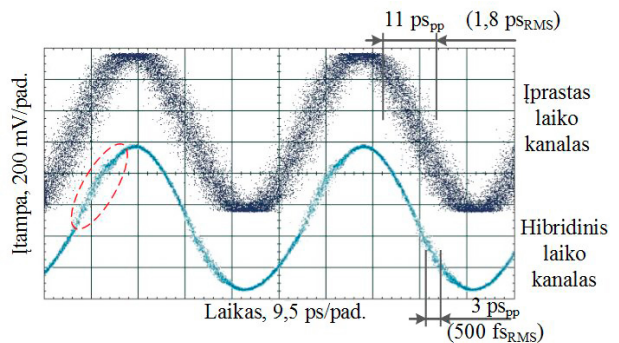
Siūlomo hibridinio laiko kanalo (6 pav.) pagrindiniai fazės triukšmo šaltiniai yra šie:

- sklaidos magnetinio srauto pereinamajame procese kuriama elektrovara $E_{sklaidos}$;
- keturių strobavimo įtaisų (6 pav., nuo Strob. gr. 1 iki Strob. gr. 4) sukelti netiesiniai signalo iškreipiai (ypač pasireiškiantys matuojant signalus, kurių momentinės įtampos vertės viršija ~400 mV, kai strobavimo grandinių darbo taškas pasislenka į mažiau tiesinę strobavimo impulso dalį);
- vieno kanalo matuojamo signalo elektromagnetinis poveikis gretimam matavimo kanalui (pvz., 6 pav. Strob. gr. 1 veikia Strob. gr. 2 kanalą, o Strob. gr. 3 veikia Strob. gr. 4 kanalą);
- atraminių virpesių amplitudžių triukšmai;
- paties osciloskopo strobavimo impulsų fazės triukšmas.

Dėl išvardintų priežasčių rekonstruoto matuojamo signalo vaizdas būna iškraipytas (10 pav.).



10 pav. Rekonstruoti atraminiai harmoniniai virpesiai ir matuojamas signalas
Fig. 10. Reconstructed the measured (blue) and reference (green and gray) signals



11 pav. Fazės triukšmo apraška matuojamame signale įprastame ir hibridiniame laiko kanaluose
Fig. 11. Phase noise distribution in a measured signal in traditional and hybrid time-bases

Matuojant 21 GHz harmoninį virpesį vidutinė kvadratinė imčių triukšmo vertė siekia 500 fs (11 pav.). Pažymėtina, kad triukšmas hibridiniame laiko kanale pasireiškia netolygiai ir mažiausioji jo vertė gaunama stačiausiose atraminių virpesių atkarpose ir kai matuojamas signalas rekonstruojamas pagal gretimame kanale matuojamą atraminį virpesį (t. y. tame pačiame dvikanaliame strobavimo įtaise (6 pav.).

Laiko „lango“ vietose, kur matuojamo signalo rekonstravimo procedūra vykdoma pagal antrą $\pi / 2$ uždelstą harmoninį virpesį, kuris matuojamo signalo atžvilgiu yra strobuojamas kitame, gretimame (šiuo atveju Strob. gr. 1 ir Strob. gr. 3 atitinkamai (6 pav.)) strobavimo įtaise, atsiranda maksimalių matuojamo signalo fazinių iškreipimų (11 pav.). Tai yra pagrindinis eksperimentiniuose tyrimuose naudojamos konstrukcijos (6 pav.) trūkumas. Strobavimo impulso išsišakojimo taškas fiziškai yra santykinai toli nuo strobavimo įtaisų, dėl šio papildomo strobavimo impulsų sklaidimo vėlinimo gretimuose strobavimo įtaisuose vienas kito atžvilgiu atsiranda išsišakojusių strobavimo impulsų papildomų fazinių triukšmų.

Išvados

1. Stroboskopinio osciloskopo įprasto laiko kanalo veikimo tikslumą prastina įvairūs veiksniai, pvz.: sinchronizavimo grandinės nestabilumas, skaičiuojamų stačiakampių impulsų trukmės neapibrėžtis, pjūklo formos impulsų netiesiškumas ir pan. Dėl to siaurėja osciloskopo praleidžiamųjų dažnių juosta, blogėja jo kitos metrologinės charakteristikos. Darbe pasiūlyta hibridinio laiko kanalo sandara, taigi atsisakyta įrenginių, lemiančių minėtus įprasto kanalo trūkumus. Hibridiniam laiko kanalui įgyvendinti būtinas matuojamam signalui sinchroniškas harmoninis atraminis virpesys.
2. Eksperimentinė patikra parodė, kad tame pačiame stroboskopiniame osciloskope pakeitus įprastą laiko kanalą siūlomu hibridiniu, matuojamo signalo fazės triukšmą vidutiniškai galima sumažinti per keturis kartus (nuo ~2 ps iki 0,5 ps), o tam tikrais atvejais – net 10 kartų (iki ~0,2 ps). Pažymėtina, kad naudojant hibridinį laiko kanalą fazės triukšmas nėra pastovus ir priklauso nuo matuojamo signalo dažnio. Pagrindinis hibridinio laiko kanalo trūkumas – galimai susiaurinta taikymo sritis, nes, be matuojamo signalo, į osciloskopą dar būtina perduoti atraminį sinfazinį harmoninį virpesį, kurio periodas apibrėžia matavimo „lango“ plotį. Tačiau pažymėtina, kad atraminis harmoninis virpesys yra neatsiejama daugumos testuojamų duomenų perdavimo arba kompiuterizuotų sistemų įrenginių dalis arba gali būti nesunkiai gautas iš perduodamų duomenų taktinių impulsų.

Literatūra

- Blair, J. J. 1998. Error estimates for frequency responses calculated from time-domain measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 47(2): 345–353. <https://doi.org/10.1109/19.744173>
- Grove, W. M. 1966. Sampling for oscilloscopes and other RF systems Dc through X-Band, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 14(12): 629–635. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1966.1126342>
- Hale, P.; Williams, D. F.; Remley, K. A. 2007. The Sampling oscilloscope as a microwave instrument, *IEEE Microwave Magazine* 8(4): 59–68. <https://doi.org/10.1109/MMW.2007.383954>
- Hale, P.; Wang, C. M.; Williams, D. F.; Remley, K. A.; Wepman J. D. 2006. Compensation of random and systematic timing errors in sampling oscilloscopes, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 55(6): 2146–2154. <https://doi.org/10.1109/TIM.2006.880270>
- Luscher, R. E. 1968. Time-base circuit for sampling scope, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 17(2): 111–115. <https://doi.org/10.1109/TIM.1968.4313680>
- Nader, C.; Van More, W.; Bjorsell, N.; Handel, P. 2013. Wideband radio frequency measurements: from instrumentation to sampling theory, *IEEE Microwave Magazine* 14(1): 85–98. <https://doi.org/10.1109/MMM.2012.2234643>
- Nelson, M. 2000. A new technique for low-jitter measurements using equivalent-time sampling oscilloscopes, in *Proceedings of the ARFTG 56th Conference on Digest-Fall*, 30 November–1 December 2000, Boulder, USA, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2000.327422>
- Yuan, W.; Jiangmiao, Z.; Jingyuan, M. 2013. Correction of time base error for high speed sampling oscilloscope, in *Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI'2013)*, 16–19 August 2013, Harbin, China, 88–91.
- Wang, C. M.; Hale, P. D. 2012. Sequential estimation of time-base corrections for an arbitrarily long waveform, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 61(10): 2689–2694. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2193692>
- Wang, C. M.; Hale, P. D.; Coakley, K. J.; Clement, T. S. 2002. Uncertainty of oscilloscope timebase distortion estimate, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 51(1): 53–58. <https://doi.org/10.1109/19.989897>

TIME-BASE NOISE REDUCTION METHOD OF SAMPLING OSCILLOSCOPE

T. Tankeliun, O. Zaytsev, V. Urbanavičius

Abstract

This paper proposes a method to increase precision of sampling oscilloscopes time-base then using a new hybrid time-base architecture. The traditional time-base of sampling oscilloscope has three kinds of time base error including time base drift, time base jitter and time base distortion. New hybrid time-base architecture allows to minimize this kind of errors.

Keywords: sampling oscilloscopes, jitter, hybrid time-base, random sampling, signal reconstruction by harmonic continuous-wave.