

Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

STROBOSKOPINIO OSCILOSKOPO VERTIKALIOJO KANALO TRIUKŠMO MAŽINIMO METODAS

Tomaš TANKELIUN*

UAB „Eltesta“, Vilnius, Lietuva

Gauta 2021 m. birželio 28 d.; priimta 2021 m. birželio 30 d.

Santrauka. Straipsnyje yra pateikiamas metodas, leidžiantis pagerinti stroboskopinio osciloskopo vertikaliojo kanalo jautrumą praplečiant įprastą kanalo architektūrą. Pagrindinis osciloskopo vertikaliojo kanalo mazgas yra strobavimo įtaisas (signalų maišytuvas), kuris sistemose, gaminamose iš diskrečiųjų elementų, dažniausiai įgyvendinamas taikant aukštadažnius diodus. Strobavimo įtaise vykdoma tiriamojo aukštadažnio signalo imties transformacija į žemadažnį ekvivalentinį signalą (kitaip vadinamas balanso impulsu). Įprastos architektūros strobavimo įtaise šis impulsas yra kvantuojamas vieną kartą, kai amplitudė esti didžiausia, taip pasiekiamas geriausias signalo ir triukšmo santykis. Straipsnyje yra analizuojami strobavimo įtaiso grandinės darbo parametrai ir jų įtaka įtaiso išėjimo signalui, taikant šiuo metu rinkoje sparčiausius (15 MHz) didelio skiltiškumo (18-bit) analoginius skaitmeninius keitiklius siekiama sumažinti įprastos architektūros vertikaliojo kanalo amplitudės triukšmą.

Reikšminiai žodžiai: stroboskopinis osciloskopas, strobavimo įtaisas, vertikalusis kanalas, analoginis skaitmeninis keitiklis, ekvivalentinio laiko strobavimo metodas.

Įvadas

Stroboskopinis osciloskopas yra svarbus matavimo prietaisas dirbant su periodiniais arba pasikartojančiais elektriniais signalais plačiame dažnių ruože. Pagrindiniai tokių matavimo sistemų privalumai atsiskleidžia matuojant ir derinant duomenų apdorojimo ir perdavimo įrangą, dirbančią su sparčiais, mažos amplitudės informaciniais signalais, kai realiojo laiko matavimo sistemų taikymas yra negalimas dėl finansinių išteklių ribotumo ir metrologinių parametrų aukštų reikalavimų, tokių kaip plataus praleidžiamųjų dažnių ruožo pločio ir didelio signalo bei triukšmo santykio (Hale et al., 2005).

Stroboskopiniuose osciloskopuose matuojamo signalo vaizdas yra sudaromas ne tiesiogiai (realiuoju laiku), o taikant specialius signalų apdorojimo metodus (Hale et al., 2007). Matuojamas aukštadažnis signalas yra diskretizuojamas santykinai žemame dažnyje, dar vadinamame tarpiniu arba ekvivalentiniu. Rekonstruojant matuojamo signalo vaizdą yra sudaroma ekvivalentinė laiko ašis, kurioje jos ekvivalentinio diskretizavimo dažnis priklauso ne nuo realaus matavimo sistemos diskretizavimo laiko žingsnio, o nuo sistemos galimybės tiksliai matuoti arba pavėlinti laiką tarp imties ir trigerio įvykio (1 pav.) (Cas-

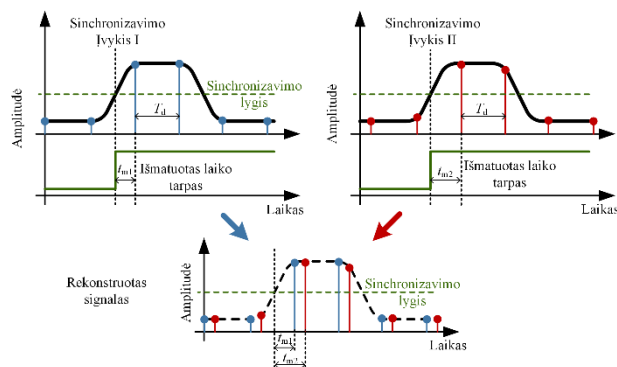
sioli ir Mecozzi, 2009). Tinkamai nustatytas santykis tarp vėlinimo (tarp trigerio įvykio ir imties paėmimo impulso) ir matuojamo periodinio signalo vieno periodo trukmės leidžia tiksliai atkurti osciloskopo ekrane šio signalo periodo vaizdą. Pagal laiko momento tarp signalo imties ir trigerio įvykio matavimo arba vėlinimo būdą yra išskiriami keli ekvivalentinės laiko ašies sudarymo metodai:

- nuoseklaus ekvivalentinio laiko strobavimo;
- atsitiktinio ekvivalentinio laiko strobavimo;
- koheretinio ekvivalentinio laiko strobavimo;
- sinuso ir kosinuso interpoliacijos.

Kiekvienas iš išvardintų metodų turi savo privalumų ir trūkumų, todėl ekvivalentinio laiko strobavimo metodo pasirinkimas priklauso nuo reikalaujamų metrologinių savybių (pvz., galimybės rekonstruoti signalo vaizdą prieš trigerio įvykį – atsitiktinis ekvivalentinis strobavimas) ir analizuojamos sistemos, kurios signalai yra matuojami, savybių (pvz., galimybė parūpinti sistemai atraminį sinfazinį signalą – sinuso ir kosinuso interpoliacija) (Yang et al., 2013; Nader et al., 2013; Remley et al., 2003).

Matavimo sistemos, kuriose laiko ašies rekonstrukcijos operacija vykdoma papildomo harmoninio atraminio signalo pagrindu, pasižymi paprastesne sandara, nes jose nėra būtini matuojamo signalo ir laiko bazės sinchronizavimo

*Autorius susirašinėti. El. paštas tomas.tankeliun@gmail.com



1 paveikslas. Signalo laiko ašies rekonstrukcija sinchronizacijos įvykio atžvilgiu
Figure 1. Reconstruction of signal time axes regarding to the trigger event

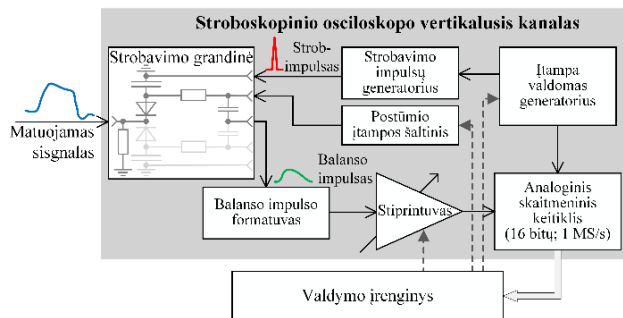
mazgai (Nelson ir Zivny, 2009; Kobayashi et al., 2006). Tokios sistemos pasižymi aukštesniu tikslumu, nes rekonstruotoje laiko ašyje yra eliminuojami minėtiems mazgams būdingi neapibrėžtumai. Tačiau matuojamo signalo rekonstrukcijos neapibrėžties dydis priklauso tik nuo osciloskopo vertikaliojo kanalo metrologinių parametrų tikslumo. Galima būtų paminėti du pagrindinius: amplitudės triukšmą ir netiesinius amplitudinius iškraipymus. Amplitudės triukšmas tiesiogiai lemia laiko ašies triukšmą (angl. *jitter*), o netiesiniai amplitudės iškraipymai laiko ašies rekonstrukcijos metu perskaičiuojami į netiesinius laiko mastelio iškraipymus. Šie neapibrėžties šaltiniai mažina visos metrologinės sistemos, grįstos sinuso ir kosinuso interpoliacijos metodu, matavimo rezultatų vientisumą (angl. *signal integrity*).

Šiame straipsnyje, siekiant sumažinti vertikaliojo kanalo amplitudinį triukšmą, nagrinėjama įprastos architektūros vertikaliojo kanalo sandara ir pagal eksperimentinių tyrimų rezultatus siūlomi jos modernizavimo būdai.

Straipsnio sandara yra tokia: pradžioje pateiktas viso vertikaliojo kanalo ir jo pagrindinio mazgo – strobavimo įtaiso (SĮ) – veikimo principas, aptariami kanalo matavimo neapibrėžties šaltiniai, eksperimentinio maketo sandara ir tyrimų rezultatai, pabaigoje daromos išvados apie metodikos taikymo galimybę stroboskopiniuose osciloskopuose.

1. Vertikaliojo kanalo sandara ir veikimo principas

Stroboskopinio osciloskopo vertikalųjų kanalą sudaro strobavimo įtaisas, balanso impulso formavimo įrenginys, impulso stiprintuvas, analoginis skaitmeninis keitiklis (ASK), precizinės įtampos šaltiniai ir papildomi valdymo ir darbo režimo kompensavimo įrenginiai (Kahrs et al., 2003). Pagrindinis vertikaliojo kanalo mazgas yra strobavimo įtaisas. Matuojamo signalo aukštadažnio spektro transformacija į žemesnio dažnio sritį vyksta SĮ strobavimo grandinėje. Aparatiškai SĮ gaminamas kaip atskiras matavimo prietaiso mazgas uždareme korpuse naudojant aukštesnės kokybės elementinę bazę ir konstrukcines medžiagas, nes jam taikomi aukščiausi reikalavimai visų įrenginio metrologinių parametrų atžvilgiu.



2 paveikslas. Stroboskopinio osciloskopo vertikaliojo kanalo funkcinė schema
Figure 2. Vertical channel block diagram of sampling oscilloscope

Supaprastinta SĮ strobavimo grandinės principinė elektrinė schema pateikta 3 paveiksle. Jos pagrindiniai elementai yra du aukštadažniai diodai D_1 ir D_2 . $U_{už1}$ ir $U_{už2}$ įtampos šaltiniai nustato diodų užtvarinės įtampos dydį, taip keičiamas jų darbo režimas. Kiekvieną kartą atsirandant strobavimo impulso signalui išėjime, labai trumpam laiko tarpui grandinės diodai nustatomi į atvirą būseną. Kai diodai yra šios būsenos, nenulinės vertės matuojamo signalo įtampa, esanti grandinės įėjime, sukuria srovę, kuri tekėdama per diodus įkrauna kondensatorius C_1 ir C_2 . Šių kondensatorių sukauptas elektros krūvis tiesiogiai proporcingas matuojamo įėjimo signalo momentinės įtampos (imties) vertei.

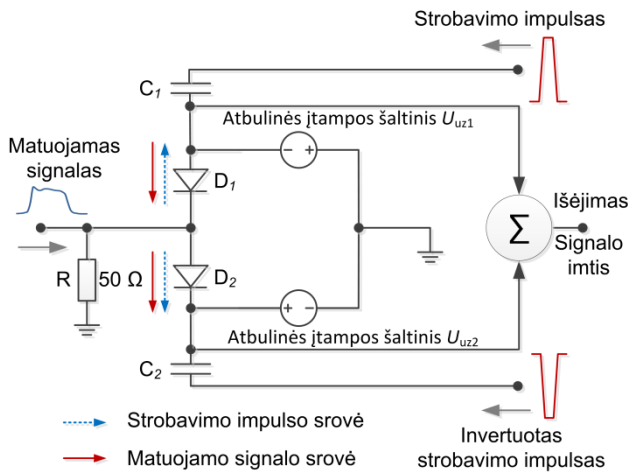
Siekiant užtikrinti tik matuojamo įėjimo signalo krūvio pernašą į kondensatorius C_1 ir C_2 (3 pav.), grandinė palaikoma balanso būsenos, t. y. diferencialiniai elektros krūviai, kuriuos sukuria teigiamas ir neigiamas strobavimo impulsai, yra panaikinami – jie kompensuoja vienas kitą. Tokiu būdu tik matuojamam signalui proporcingas sukauptas kondensatoriuose krūvis siunčiamas į grandinės išėjimą, iš kur jis toliau stiprinamas ir skaitmeninamas analoginiame skaitmeniniame keitiklyje.

Strobavimo įtaiso praleidžiamųjų dažnių juostos plotis yra atvirkščiai proporcingas laiko tarpui, kurio metu diodai yra atverti. Toks laiko intervalas vadinamas „vartų pločiu“ (angl. *gate width*) ir yra žymimas t_g (Grove, 1966). Diodo užtvarinės įtampos lygis ir strobavimo impulsas nustato „vartų plotį“ t_g . Yra įrodyta (Grove, 1966), kad strobavimo įtaiso praleidžiamųjų dažnių juostos plotis apytiksliai gali būti apskaičiuotas pagal tokią formulę:

$$\Delta F \cong \frac{0,35}{t_g},$$

čia t_g – „vartų pločio“ laiko trukmė.

Jeigu strobavimo impulso forma, t. y. t_g , nekinta, tuomet iš formulės matyti, kad strobavimo grandinės praleidžiamųjų dažnių juostos plotis gali būti plečiamas didinant diodo užtvarinės įtampos vertę $U_{už}$, dėl to atitinkamai mažės t_g . Tačiau toks veiksmas blogina SĮ jautrumą, nes esant pastoviam triukšmo lygiui, kuris veikia sukauptą



3 paveikslas. Supaprastinta strobavimo įtaiso grandinės principinė elektrinė schema
Figure 3. Simplified schematic diagram of the sample and hold circuit

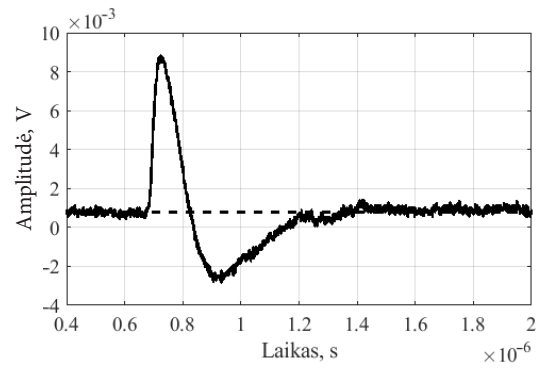
kondensatoriuje krūvį, naudingą matuojamą signalą atitinkantis krūvis mažėja, mažėjant t_g trukmei. Tokiu būdu mažėja matuojamo signalo ir triukšmo santykis. Strobavimo įtaise didėja įėjime generuojamo įtampos triukšmo lygis (t. y. mažėja grandinės jautrumas) didinant diodų užtvarinės įtampos lygį. Taigi, egzistuoja atvirkštinė priklausomybė tarp SĮ praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ir įtaiso jautrumo.

Vertikalojo kanalo funkcinė schema pateikta 2 paveiksle. Ją sudaro pagrindiniai kanalo mazgai.

2. Matavimo neapibrėžtumo šaltiniai

Osciloskopo vertikalojo kanalo praleidžiamųjų dažnių juosta nėra begalinė – ją riboja stiprintuvo ir kitų jo struktūrą sudarančių elementų ribiniai dažniai arba pralaidumo juostos. Paprastai naudojamų stiprintuvų praleidžiamųjų dažnių juosta neviršija 30 MHz. Vertikalųjį kanalą galima analizuoti kaip dinaminę sistemą, jos savybės turėtų pasikeisti, kai keičiasi ASK diskretizavimo dažnis. Pastovaus laiko sistemos, kurių būseną laikui bėgant nesikeičia, vadinamos ergodinėmis sistemomis. Matavimo sistemose ergodiškumas pasireiškia tada, kai matavimo rezultatai laike (t. y. daugartiniai vienos sistemos matavimai) sutampa su matavimo rezultatais erdvėje (t. y. tuo pačiu metu matuojant daugelį sistemų).

Osciloskopuose, kuriuose imčių strobavimas atliekamas strobavimo įtaise (o ne, pavyzdžiui, „strobavimo keitiklyje“), imčių diskretizavimo dažnis paprastai yra mažesnis nei 10 MHz. Esant tokiam santykinai žemam dažniui, ilgų signalų fragmentų matavimas trunka ilgai. Kita vertus, strobavimas žemuoju dažniu leidžia padidinti prietaiso jautrumą, t. y. sumažinti jo paties sukeliama triukšmą. Taip yra dėl to, kad vertikalųjį kanalą sudarančių stiprintuvų triukšmas tiesiogiai priklauso nuo jų praleidžiamųjų dažnių juostos pločio – kuo siauresnė juosta – tuo mažesnis yra stiprintuvo triukšmas. Poreikį riboti diskretizavimo dažnį realiuose osciloskopuose lemia tai, kad strobavimo įtaiso išvesties elektros krūvis, proporcingas išmatuoto signalo imčiai, yra



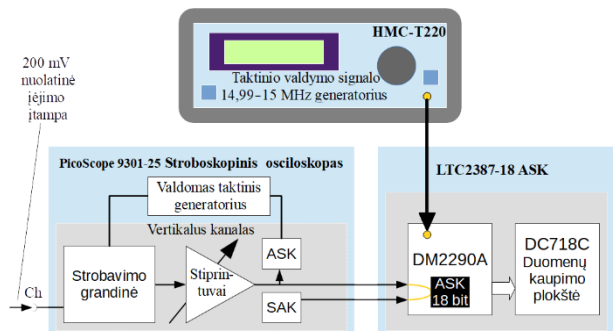
4 paveikslas. Matuojamo signalo imties balanso impulsas
Figure 4. Charge pulse of measured sample

labai mažas ir reikalauja stiprinimo dinaminiam diapazonui atitikti (kartais dešimteriopai).

Idealiu atveju, parenkant santykį tarp balanso impulso diskretizavimo dažnio ir osciloskopo strobavimo nuosavo dažnio, nagrinėjama dinaminė matavimo sistema gali atitikti ergodinės sistemos būseną. Tokioje sistemoje, jeigu triukšmo pasiskirstymo dėsnis atitiktų normalųjį pasiskirstymą, o balanso impulso forma būtų artima stačiakampe – matuojant vieną balanso impulsą N kartų, signalo ir triukšmo santykį galima būtų sumažinti $N^{1/2}$ kartų. Realiau atveju balanso impulso forma skiriasi nuo stačiakampės ir realus triukšmo mažinimo koeficientas yra mažesnis. Jo dydį nusako balanso impulso forma (4 pav.), kuri priklauso nuo balanso impulso formavimo įtaiso charakteristikų (2 pav.).

3. Eksperimentinis maketas

Amplitudinio triukšmo charakteristikoms matuoti buvo naudojamas vertikalusis 25 GHz dažnių juostos *PicoScope 9300* serijos stroboskopinio osciloskopo kanalas. Vertikalajame *PicoScope 9300* kanale (2 pav.) ASK buvo išjungtas, o balanso impulso signalas iš paskutinio stiprintuvo pakopos buvo tiesiogiai siunčiamas į *LTC2387-18* ASK įėjimą. Didžiausias šio ASK diskretizavimo dažnis siekia 15 MHz, kai jo skiriamoji geba yra 18 bitų, o amplitudinio triukšmo vidutinė kvadratinė vertė siekia $70 \mu V_{\text{efekt.}}$ Nagrinėjamo vertikalojo *PicoScope 9300* kanalo nuosavas triukšmas buvo $1,3 mV_{\text{efekt.}}$ Statistiniams triukšmo charakteristikų apdorojimui išmatuota 131 000 mėginių. Eksperimentinio maketo struktūrinė schema pateikta 5 paveiksle.



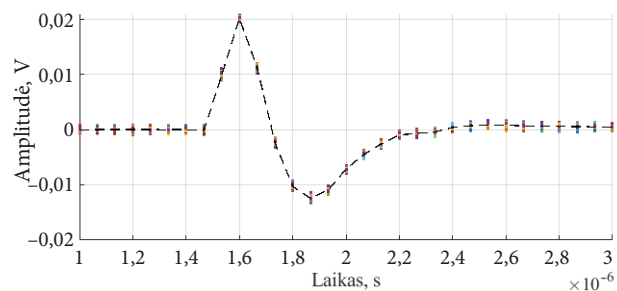
5 paveikslas. Eksperimentinio maketo struktūrinė schema
Figure 5. Block diagram of the experimental setup organization

4. Tyrimo rezultatų analizė

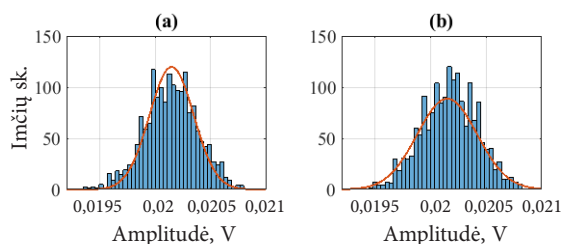
Analizuojant išmatuotus duomenis 131 tūkst. imčių masyvas skaidomas į 3 μ s trukmės kadrus. Kiekvieną kadrą sudaro 75 imtys, o balanso impulso trukmė kadre siekia apie 1 μ s, tai atitinka maksimalų *PicoScope 9300* vertikaliojo kanalo strobavimo dažnį. Balanso impulso vidutinė reikšmė iš 1747 imčių ir tų imčių pasiskirstymas kiekviename taške pavaizduotas 6 paveiksle. Iš pateikto grafiko matome, kad balanso impulso signalas užima 15 taškų kadre. Kiekvieno taško amplitudės ir triukšmo santykis skiriasi, o paskutiniųjų yra ypač mažas ir turi mažą įtaką galutiniams skaičiavimo rezultatams.

Kadrų masyvo pozicionavimas laiko ašyje atliekamas tiksliai parenkant taktinio valdymo signalo ir strobavimo dažnio santykį, taip leidžiant eliminuoti laiko dreifo įtaką galutiniams skaičiavimo rezultatams. Laiko ašies dreifo įtaka įvertinama analizuojant triukšmo pasiskirstymą kadro taškuose, priklausančiuose stačiausioms balanso impulso vietoms, t. y. impulso priekiniam frontui.

Osciloskopo amplitudinio triukšmo pasiskirstymai parodyti 7 paveiksle, kur yra palygintos LTC2387-18 ASK (7 pav., a) ir osciloskopo vertikaliojo kanalo (7 pav., b) triukšmo histogramos. Metodo algoritmas skaičiavimuose naudoja pirmas balanso impulso imtis, kurių signalo ir triukšmo santykis yra didžiausias. Naudojamų taškų



6 paveikslas. LTC2387-18 ASK 15 MHz diskretizuoto strobavimo grandinės išėjimo impulso vidutinė vertė ir imčių pasiskirstymas kiekviename laiko ašies taške
Figure 6. LTC2387-18 ASK 15 MHz discretized output pulse of sampling circuit: averaged and distribution of samples on each time axes point



7 paveikslas. Amplitudinio triukšmo pasiskirstymas: a – kanale, kai taikomas triukšmo mažinimo metodas; b – *PicoScope 9300* vertikaliojo kanale

Figure 7. Distribution of noise: a – on channel with noise reduction method; b – on vertical channel of sampling oscilloscope *PicoScope 9300*

skaičius priklauso nuo ASK diskretizavimo dažnio ir balanso impulso trukmės. Kai paskutiniojo trukmė neviršija 1 μ s, naudingų imčių skaičius neviršija 9 taškų. Siūlomas metodas leidžia sumažinti vertikaliojo kanalo triukšmą paskutiniame kanalo stiprintuvo kaskade nuo 265 μ V_{efekt.} iki 202 μ V_{efekt.}, t. y. 1,31 karto, neribojant stroboskopinio osciloskopo maksimalaus 1 MHz strobavimo dažnio. *PicoScope 9300* stroboskopiniame osciloskope efektinis amplitudinis triukšmas darbiname ekrane sumažinamas iki 1 mV_{efekt.}

Išvados

Stroboskopinio osciloskopo vertikaliojo kanalo amplitudinis triukšmas yra viena iš pagrindinių netikslaus mažos amplitudės signalo formos matavimo priežasčių. Šiame darbe pasiūlytas ir išanalizuotas vertikaliojo kanalo amplitudinio triukšmo šalinimo metodas, grįstas išmatuotos imties balanso impulso diskretizavimo dažnio keitimu, nekeičiant matavimo sistemos įėjimo strobavimo spartos. Vertikalųjį kanalą vertinant kaip dinaminę sistemą, buvo nustatytos balanso impulso diskretizavimo dažnio ribos, kai triukšmo vidurkinimas neatitinka vidutinio normaliojo pasiskirstymo. Remiantis gautais rezultatais buvo parinktas naujas vertikaliojo kanalo ASK ir surinkta matavimo sistema *PicoScope 9300* osciloskopo pagrindu. Kai sistemos diskretizavimo dažnis artimas vertikaliojo kanalo dažniui, signalo triukšmo santykis gali padidėti daugiau nei 1,31 karto. Toks rezultatas pasiektas esant 15 MHz diskretizavimo dažniui ir 9 išmatuotoms balanso impulso imtims. Norint pasiekti aukštesnius rezultatus, naudojant tą pačią aparatinę dalį, privaloma mažinti sistemos strobavimo dažnį ir ilginti balanso impulso trukmę, siekiant surinkti kuo daugiau imčių, kai impulso amplitudė yra aukščiausia.

Literatūra

- Cassoli, D., & Mecozzi, A. (2009). Minimum-phase impulse response channels. *IEEE Transactions on Communications*, 57(12), 3529–3532. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2009.12.0801082>
- 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. D., Wang, C. M., Williams, D. F., & Remley, K. A. (2005). 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>
- Hale, P. D., Williams, D. F., & Remley, K. A. (2007). The sampling oscilloscope as a microwave instrument. *IEEE Microwave Magazine*, 8(4), 59–68.
- Yang, K., Tian, S., & Song, J. (2013). A high speed random equivalent sampling method based on time-stretch [Conference presentation]. 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement (IMSNA). <https://doi.org/10.1109/MMW.2007.383954>

- Kahrs, M. (2003). 50 years of RF and microwave sampling. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 51(6), 1787–1805. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2002.806934>
- Kobayashi, K., Ems, S., DeMott, J., & Schnecker, M. (2006). *Coherent interleaved sampling* (United States patent application publication No. 2006/0177018A1). https://patent-scope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US41697222&_fid=WO2006086257
- Nader, C., Van Moer, W., Bjorsell, N., & Handel, P. (2013). Wide-band radio frequency measurements: From instrumentation to sampling theory. *IEEE Microwave Magazine*, 14(2), 85–98. <https://doi.org/10.1109/MMM.2012.2234643>
- Nelson, M. A., & Zivny, P. R. (2009). *Sequential equivalent-time sampling with an asynchronous reference clock* (United States patent application publication No. 2009/0237072A1). <https://patentimages.storage.googleapis.com/c4/18/03/941c10f76e9b48/US20090237072A1.pdf>
- Remley, K. A., & Williams, D. F. (2003). Sampling oscilloscope models and calibrations. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 3, 1507–1510. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2003.1210422>

RESEARCH OF RELATION OF SAMPLERS FREQUENCY CHARACTERISTICS

T. Tankeliun

Abstract

The approach to reduce the amplitude noise of a vertical channel of the sampling oscilloscope is presented in this paper. In general, the vertical channel of the sampling oscilloscope consists of a high-frequency sampling circuit and a relatively low-frequency sample transmission path along with a high bit resolution analog-to-digital converter. The paper presents a method to improve the sensitivity of the vertical channel of a stroboscopic oscilloscope by extending the conventional channel architecture. The main vertical channel unit of the oscilloscope is a sampling device (sampler), which made of discrete elements and usually implemented using high frequency diodes. The sampler performs a transformation of the sample of the high-frequency signal under test into a low-frequency equivalent signal (otherwise called a balance impulse). In a conventional sampling device, this pulse is quantized once the amplitude is at its highest, thus achieving the best signal-to-noise ratio. The paper analyzes the operating parameters of the sampling device circuit and their influence on the output signal of the sampler. In this approach uses the fastest (15 MHz) high-resolution (18-bit) analog-to-digital converters currently on the market to reduce the amplitude noise of vertical channel based on conventional architecture. Our research has shown that it is possible to obtain an increase in the signal-to-noise ratio of almost 1.3 times.

Keywords: sampling oscilloscope, sampler, vertical channel, analog-to-digital converters, equivalent time sampling, noise reduction method.