

# 1/f triukšmas elementariuose (ne)persiklojančių stačiakampių impulsų modeliuose

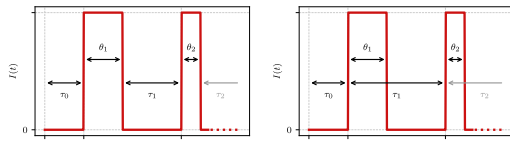
## 1/f noise from elementary (non)overlapping rectangular pulse models

Aleksejus Kononovicus, Bronislovas Kaulakys

Vilniaus universitetas, Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, Saulėtekio al. 3, 10257 Vilnius  
aleksejus.kononovicus@tfai.vu.lt

Baltas triukšmas ir Brauno judėjimas yra du geriausiai suvokiami svyravimų įvairiose medžiagose ir prietaisuose pavyzdžiai [1]. Baltas triukšmas dažnai kyla dėl šiluminių svyravimų arba dėl diskretiško aptiktų dalelių pobūdžio (t.y., šratinio triukšmo). Jam būdinga tai, kad jis nėra koreliuotas laike, o jo galios spektrinis tankis yra plokščias. Brauno judėjimas yra baltojo triukšmo laikinis integralas, todėl pats signalas yra koreliuotas, o koreliacijos nėra tarp šio signalo pokyčių. Brauno judėjimas pasižymi  $S(f) \sim 1/f^2$  formos galios spektriniu tankiu. Tačiau įvairiose medžiagose ir prietaisuose, ypač žemo dažnio diapazone, dažnai pastebimas  $S(f) \sim 1/f^\beta$  (čia  $0.5 \leq \beta \leq 1.5$ ) formos galios spektrinis tankis. Šio triukšmo, literatūroje dažnai vadinamo 1/f triukšmu, žemo dažnio triukšmu, mirgėjimo triukšmu arba rausvuju triukšmu, prigimtis išlieka atviras klausimas [2–4].

Modelis pasiūlytas [5, 6] darbuose aprašo vieno krūvininko (pvz., elektrono), dreifuojančio per kondensuotą medžiagą, pagavimo–išlaisvinimo procesą. Modelyje krūvininkas arba yra laisvas (dreifuoja laidumo juostoje taip generuodamas elektros srovę), arba yra įkalintas pagavimo centre (šiuo atveju elektros srovė nebūtų generuojama). Šiame modelyje stebimas signalas yra sudarytas iš nepersiklojančių stačiakampių impulsų (žr. 1 pav. kairėje). Čia mes apibendriname šį modelį leisdami impulsams susiliesti ir persikloti.

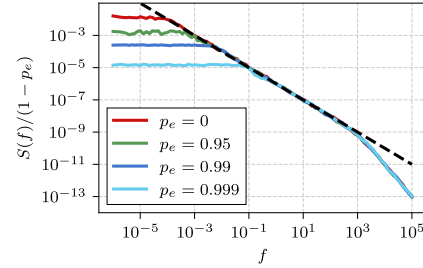


1 pav. Pavyzdinės nepersiklojančių ir persiklojančių impulsų sekos:  $\tau_i$  – tarpų trukmės,  $\theta_i$  – impulsų trukmės.

Originaliame, nepersiklojančių stačiakampių impulsų, modelyje 1/f triukšmas yra gaunamas, kai impulsų trukmės yra sąlyginai ilgos,  $\langle \theta \rangle \gg \tau_{\min}$  (atitinka  $\gamma_\theta \ll \gamma_{\max}$ ), o tarpai tarp impulsų yra pasiskirstę pagal laipsninį dėsnį  $p(\tau) \sim \tau^{-2}$  [5]. Toks  $\tau$  skirstinys gali būti gautas darant prielaidą, kad atskirų pagavimo centrų išlaisvinimo spartos yra atsitiktinės ir tolygiai pasiskirsčiusios  $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$  intervale [6].

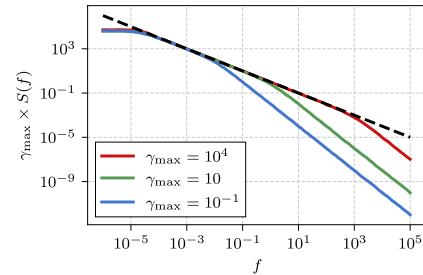
Impulsai gali susiliesti tuo atveju (tarpas tarp jų išnyksta), jei po pagavimo krūvininkas per nykstantai mažą laiką (per kurį srovės trūkis nėra detektuojamas) yra išstumiamas iš pagavimo centro. Tegu tokio “momentinio” išstūmimo tikimybė yra  $p_e$ . Tokiu atveju švarus 1/f triukšmas vis tiek yra stebimas, bet pakinta (sumažėja) signalo galia ir susiaurėja 1/f triukšmo

dažnių sritis (žr. 2 pav.).



2 pav. Galios spektrinio tankio kreivės skirtingiems  $p_e$ .

Norint leisti impulsams persikloti galima būtų leisti neigiamus  $\tau_i$ , bet toks atvejis neturi fizikinės prasmės, o bandant skaitmeniškai jį realizuoti kyla nuoseklumo problemų. Paprastesnis sprendimas yra pakeisti  $\tau_i$  interpretavimą: padarant jį tarpu tarp impulsų pradžių. Originalią interpretaciją atspindi 1 pav. kairysis grafikas, o pakeistą 1 pav. dešinysis grafikas. Dėl to reikia keisti ir modelio fizikinę interpretaciją: laiko intervalais  $\tau_i$  įvyksta medžiagos sužadimas, kuris iššaukia stačiakampį atsaką, kurio trukmė  $\theta_i$ . Kai  $\theta_i > \tau_i$ , tada  $i$ -tasis ir  $(i + 1)$ -asis impulsai persiklos.



3 pav. Galios spektrinio tankio kreivės skirtingoms  $\gamma_{\max}$ .

Kaip matome 3 pav., impulsų persiklojimas nesugadina ir neiškreipia 1/f triukšmo. Persiklojančių impulsų atveju, švarus 1/f triukšmas gaunamas net kai impulsų trukmės yra sąlyginai trumpos,  $\gamma_\theta \gg \gamma_{\max}$  (paveiksle  $\gamma_\theta = 1$ ).

*Reikšminiai žodžiai:* 1/f triukšmas, žemo dažnio triukšmas, ilga atmintis, telegrafinis triukšmas

### Literatūra

- [1] S. Kogan, *Electronic noise and fluctuations in solids* (Cambridge University Press, 1996).
- [2] S. Sadegh *et al.*, *New J Phys* 16: 113054 (2014).
- [3] V. Palenskis, K. Maknys, *Sci Rep* 5: 18305 (2015).
- [4] F. Gruneis, *Phys Lett A* 383: 1401–1409 (2019).
- [5] A. Kononovicus, B. Kaulakys, *Phys Rev E* 107: 034117 (2023).
- [6] A. Kononovicus, B. Kaulakys, arXiv:2306.07009 [math.PR].