

CHIZIQLI FILTRLARGA ASOSLANGAN RAQAMLI SIGNALLARNI QAYTA ISHLASHNING PARALLEL ALGORITMLARI.

Nodirbek Namozov [0000-0001-8930-4454]

*Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Avtomatlashtirish va boshqaruv" kafedrası
assistenti, E-mail: nodirshoxnamozov@gmail.com.*

Annotation. This paper addresses the development of parallel algorithms for linear filters, which are fundamental in digital signal processing. FIR and IIR filters are analyzed through their mathematical models, and methods of approximating IIR filters by FIR structures are discussed. Parallel techniques such as polyphase decomposition and the Fast FIR Algorithm (FFA) are presented as efficient approaches to reduce computational complexity, minimize the number of multipliers, and improve energy efficiency. The proposed methods enable effective real-time processing of large-scale data streams.

Keywords: digital signal processing, linear filters, FIR, IIR, parallel algorithms, polyphase decomposition, Fast FIR Algorithm (FFA), real-time systems.

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы разработки параллельных алгоритмов для линейных фильтров, широко применяемых в цифровой обработке сигналов. На основе математических моделей проанализированы FIR- и IIR-фильтры, а также представлены методы аппроксимации IIR-фильтров FIR-структурами. Описаны параллельные методы, включая многофазную декомпозицию и алгоритм Fast FIR (FFA), позволяющие снизить вычислительную сложность, уменьшить количество умножителей и повысить энергоэффективность. Предложенные подходы обеспечивают эффективную обработку больших массивов данных в реальном времени.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, линейные фильтры, FIR, IIR, параллельные алгоритмы, многофазная декомпозиция, Fast FIR Algorithm (FFA), системы реального времени.

Annotatsiya. Mazkur maqolada raqamli signal ishlov berishda keng qo'llaniladigan chiziqli filtrlar uchun parallel algoritmlar ishlab chiqish masalasi tahlil qilinadi. FIR va IIR filtrlari matematik modellar asosida ko'rib chiqilib, IIR filtrlarni FIR filtrga yaqinlashtirish usullari bayon etilgan. Ko'p fazali dekompozitsiya va Fast FIR Algorithm (FFA) kabi parallel algoritmlar yordamida hisoblash murakkabligini kamaytirish, multiplikatorlar sonini qisqartirish va energiya samaradorligini oshirish imkoniyatlari ko'rsatib berilgan. Taklif etilgan yondashuvlar real vaqt tizimlarida katta hajmdagi ma'lumotlarni samarali qayta ishlashga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: raqamli signal ishlov berish, chiziqli filtrlar, FIR, IIR, parallel algoritmlar, ko'p fazali dekompozitsiya, Fast FIR Algorithm (FFA), real vaqt tizimlari.

Kirish

Raqamli signal ishlov berish zamonaviy axborot texnologiyalarining ajralmas qismi bo'lib, u turli sohalarda telekommunikatsiya, radiotexnika, biotibbiyot, geofizika hamda sanoat jarayonlarini boshqarishda keng qo'llaniladi. Raqamli signallarni samarali qayta ishlashning asosiy metodlaridan biri chiziqli filtrlashdir. Chiziqli filtrlar yordamida ma'lumotlarni shovqinlardan tozalash, kerakli chastota diapazonlarini ajratib olish, signal sifatini yaxshilash va real vaqt rejimida ishlash imkoniyatlari ta'minlanadi [1-8].

So'nggi yillarda raqamli tizimlarda qayta ishlanayotgan ma'lumot hajmining keskin ortishi, yuqori tezlikdagi aloqa kanallari va murakkab ko'p o'lchovli signallarning keng qo'llanilishi hisoblash samaradorligini oshirishni taqozo etmoqda [9-15]. An'anaviy ketma-ket algoritmlar bunday vazifalarda yuqori samaradorlikni ta'minlay olmaydi. Shu bois, parallel algoritmlarni ishlab chiqish va ularni real vaqt tizimlarida joriy etish dolzarb ilmiy muammo hisoblanadi [16-20].

Chiziqli filtrlarning ikki asosiy turi cheklangan impulsli javobga ega filtrlar (FIR) va cheksiz impulsli javobga ega filtrlar (IIR) raqamli signal ishlov berishda keng qo'llaniladi. FIR filtrlarning barqarorligi va faza xususiyatlarini saqlash imkoniyati, IIR filtrlarning esa hisoblash samaradorligi va kam resurs talab etishi ularni turli amaliy vazifalarda qo'llashni asoslaydi. Shu bilan birga, IIR filtrlarni parallel strukturalarda samarali ishlatish muammoli bo'lib, ularni FIR filtrlar bilan yaqinlashtirish yondashuvlari taklif etilmoqda.

Ushbu maqolada chiziqli filtrlash asosida raqamli signalni qayta ishlash uchun parallel algoritmlar ishlab chiqish masalalari ko'rib chiqiladi. Xususan, ko'p fazali dekompozitsiya, Fast FIR Algorithm (FFA) kabi yondashuvlar yordamida hisoblash murakkabligini kamaytirish, multiplikatorlar sonini qisqartirish va energiya samaradorligini oshirish imkoniyatlari ilmiy asoslangan holda tahlil qilinadi. Natijalar katta hajmdagi ma'lumotlarni real vaqt rejimida qayta ishlash uchun samarali yechimlarni taqdim etadi.

Uslubiyat

Raqamli signal ishlov berish sohasida chiziqli filtrlash asosiy metodlardan biri bo'lib, chiqish signali kirish signallarining chiziqli kombinatsiyasi sifatida hosil qilinadi. Zamonaviy hisoblash texnologiyalarida katta hajmdagi ma'lumotlarni real vaqt rejimida qayta ishlash talabi parallel algoritmlarni ishlab chiqish va ularning samarali qo'llanilishini dolzarb masalaga aylantirdi.

Ushbu bo'limda cheklangan impulsli javob (FIR) va cheksiz impulsli javob (IIR) filtrlari uchun parallel algoritmlar, shu jumladan IIR ni FIR ga yaqinlashtirish usullarini tahlil qilamiz [21-24].

Chiziqli filtr raqamli signal ishlov berishda kirish signallarini og'irlik koeffitsientlari bilan ko'paytirib, ularning yig'indisini chiqaruvchi matematik model sifatida aniqlanadi. Chiziqli filtrlarni ikki asosiy turga ajratamiz:

Agar filtrning chiqish signali faqat kirish signallariga bog'liq bo'lsa, u (FIR) filtr bo'lib, quyidagicha ifodalaymiz [25-28].

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k], \quad 0 \leq k \leq M \quad (1)$$

bu yerda $x[n]$ - kirish signali, $y[n]$ - chiqish signali, b_k - filtrning og'irlik koeffitsientlari, M - filtr uzunligi.

Agar chiqish signali avvalgi chiqish qiymatlariga ham bog'liq bo'lsa, u IIR filtr bo'lib, chiziqli filtrning umumiy matematik modeli quyidagicha ifodalaymiz.

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] - \sum_{l=1}^N a_l y[n-l], \quad 1 \leq l \leq N \quad (2)$$

(1) va (2) formulalaridan kelib chiqib, cheklangan impulsli filtr uchun $a_l = 0$, cheksiz impulsli filtr uchun $a_l \neq 0$ deb olinadi.

Chiziqli FIR filtrlarning koeffitsientlari ko'pincha simmetrik ya'ni $b_k = b_{M-k}$, $0 \leq k \leq M$ bo'ladi. Bu holda chiqish quyidagicha yoziladi

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M/2} b_k \cdot (x[n-k] + x[n-M+k]) \quad (3)$$

Natijada multiplikatorlar soni deyarli 2 baravar kamayadi, chunki simmetriya tufayli ikkita kirishning yig'indisi bitta ko'paytma bilan hisoblanadi.

FIR filtrni parallel strukturalarda samarali ishlash uchun ko'p fazali dekompozitsiya qo'llanadi. Bu usulda katta uzunlikdagi filtr kichik subfiltrlarga bo'linadi va ular mustaqil hisoblanadi. Shu orqali hisoblash murakkabligini kamaytirishimiz mumkin [29].

FIR filtr uzatish funksiyasi Z-sohadagi ifodasi quyidagicha yoziladi

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] z^{-k} \quad (4)$$

bu yerda $h[k]$ — filtr koeffitsientlari, N — filtr uzunligi, Filtrni L - qismga (fazaga) bo'lamiz. Shunda:

$$H(z) = \sum_{i=0}^{L-1} z^{-i} E_i(z^L), \quad 1 \leq L \leq N \quad (5)$$

$E_i(z)$ sub-filtr uzunligi taxminan N/L nisbatida olamiz ya'ni, har bir subfiltr asl filtr koeffitsientlari har bir m hadida filtr koeffitsientlari L -bosqich oralig'i bilan olinadi, ya'ni $m = 0 \rightarrow h[i]$, $m = 1 \rightarrow h[L + i]$, $m = 2 \rightarrow h[2L + i]$, $m = 3 \rightarrow h[3L + i]$, shunda

$$E_i(z) = \sum_{m=0}^{\lfloor (N-1)/L \rfloor} h[mL + i] z^{-m} \quad (6)$$

Har bir subfiltr mustaqil hisoblanadi, bu parallel GPU protsessorlarda hisoblash chastotasini $1/L$ ga kamaytiradi.

Agar parallel daraja L ta bo'lsa, unda L ta subfiltr olinadi, ya'ni

$$\begin{aligned} E_0(z) &= h[0] + h[L]z^{-1} + h[2L]z^{-2} + \dots \\ E_1(z) &= h[1] + h[L+1]z^{-1} + h[2L+1]z^{-2} + \dots \\ &\vdots \\ E_{L-1}(z) &= h[L-1] + h[2L-1]z^{-1} + h[3L-1]z^{-2} + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Shunday qilib, har bir subfiltr asl koeffitsientlarning ma'lum indeksleri bo'yicha hosil qilinadi.

Raqamli signal ishlov berishda IIR filtrlarni parallel ravishda qayta ishlash uchun bir usul sifatida IIR filtrning cheklangan uzunlikdagi FIR filtrga yaqinlashtirishni ko'rib chiqamiz. IIR filtrlarning uzatish funksiyasi Z -sohada quyidagicha ifodalanadi

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{l=1}^N a_l z^{-l}} \quad (8)$$

bu yerda b_k — kirish koeffitsientlari, a_l — chiqish koeffitsientlari, M va N - mos ravishda kirish va chiqish kechikish darajalari. IIR filtrning impuls javobi $h[n]$ cheksiz uzunlikka ega, chunki feedback tufayli javob eksponentsial yoki sinusoidal shaklda so'nadi. Vaqt domenida impuls javobi quyidagicha aniqlanadi:

$$h[n] = Z^{-1}\{H(z)\}, \quad n \geq 0 \quad (9)$$

Birinchi darajali IIR $H(z) = \frac{b_0}{1+a_1 z^{-1}}$ filtr uchun

$$h[n] = b_0(-a_1)^n u[n], \quad |a_1| < 1 \quad (10)$$

Ikkinchi darajali IIR $H(z) = \sum_{k=1}^K \frac{b_{k0} + b_{k1} z^{-1}}{1 + a_{k1} z^{-1} + a_{k2} z^{-2}}$ filtr uchun

$$h[n] = \sum_{k=1}^K Z^{-1}\{H_k(z)\} \quad (11)$$

bu yerda $u[n]$ — birlik qadam funksiyasi. $h[n]$ — cheksiz uzunlikda bo'lib, yuqori tartibli IIR uchun impuls javobi cheksiz uzunlikda bo'lib, parallel hisoblashda murakkablik keltirib chiqaradi.

Rekursiyani kamaytirish uchun $y[n+M]$ ni ifodasini kiritamiz

$$y[n+M] = \sum_{k=0}^M \left(\sum_{i=0}^{M-k} b_i a^{k-i} \right) x[n-k] - \sum_{l=1}^N a_l^M y[n-l] \quad (12)$$

Yaqinlashtirish usulida $h[n]$ ni cheklangan uzunlikdagi N uzunlikdagi FIR filtr sifatida kesamiz, maqsad $H_{FIR}(z)$ ni $H(z)$ ga imkon qadar yaqin qilish, ya'ni chastota javobi va faza xususiyatlarini saqlab qolish talab etiladi.

$$h_{FIR}[n] = \begin{cases} h[n], & 0 \leq n < N \\ 0, & n \geq N \end{cases} \quad (13)$$

IIR filtrning chastota javobini $H(e^{j\omega})$ yaqinlashtirish uchun optimallashtirish uchun kichik kvadratlar usulidan foydalanamiz. Bu usul yordamida FIR filtr koeffitsientlari $h_{\text{FIR}}[n]$ quyidagi minimizatsiya orqali aniqlanadi

$$\min \int_{-\pi}^{\pi} |H(e^{j\omega}) - H_{\text{FIR}}(e^{j\omega})|^2 d\omega \quad (14)$$

Keyinchalik, yaqinlashtirilgan FIR filtr uchun ko'p fazali dekompozitsiya, Fast FIR Algorithm (FFA) kabi parallel algoritmlar qo'llaniladi.

FFA algoritmi ko'p fazali dekompozitsiyaga asoslangan hisoblash usuli bo'lib, parallel FIR filtrlash jarayonida multiplikatorlar sonini kamaytirish, shu orqali apparat murakkabligini pasaytirish va energiya samaradorligini oshirishdan iborat. Ushbu yondashuv an'anaviy parallel strukturalarda mavjud bo'lgan yuqori hisoblash talablarini optimallashtiradi hamda real vaqt tizimlarida samarali ishlash imkoniyatlarini ko'rib chiqamiz.

Ko'p fazali dekompozitsiyaga asoslangan FFA algoritmi an'anaviy L-parallel FIR filtrlashda talab etiladigan hisoblash resurslarini optimallashtirishga xizmat qiladi. An'anaviy holda har bir chiqish namunasi uchun N ta multiplikatsiya amali bajariladi va L ta chiqish parallel ravishda hosil qilinsa, jami multiplikatorlar soni quyidagicha aniqlanadi

$$M_{\text{trad}} = N \cdot L \quad (15)$$

FFA yondashuvi yordamida ko'p fazali tuzilmaning algebraik qayta yozilishi orqali multiplikatorlar soni kamaytiriladi. Optimallashtirilgan holda multiplikatorlar soni quyidagi formula bilan ifodalanadi

$$M_{\text{FFA}} = 2N - \frac{N}{L} \quad (16)$$

bu yerda $\frac{N}{L}$ hadi fazalar bo'yicha taqsimlangan ortiqcha hisoblashlarni qisqartirish natijasida hosil bo'ladi.

Multiplikatorlar sonini kamaytirish evaziga qo'shuvchilar soni ortadi. Qo'shuvchilar soni quyidagi ko'rinishda ifodalanadi

$$A_{\text{FFA}} = (2L - 1) \cdot \left(\frac{N}{L} - 1\right) + C \quad (17)$$

bu yerda C - kirish va chiqish bosqichlarida talab etiladigan qo'shimcha yig'uvchilar soni. 2-parallel FFA algoritmi strukturasida ko'p fazali dekompozitsiya asosida qurilgan maxsus struktura bo'lib, bir vaqtning o'zida ikkita chiqish namunasini hisoblashga asoslanadi. Oddiy 2-parallel FIR filtrlashda multiplikatorlar soni ko'p bo'lsa, FFA yordamida ular qisqartiriladi. FIR filtrning uzatish funksiyasi $H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h[k]z^{-k}$ bo'lsa 2-fazali dekompozitsiya yordamida u quyidagicha ajratiladi $H(z) = E_0(z^2) + z^{-1}E_1(z^2)$ 2-parallel ishlovda bitta kirishdan ikkita chiqish ya'ni $L=2$ quyidagicha yoziladi.

$$\begin{aligned} Y_0(z) &= E_0(z^2) + z^{-1}E_1(z^2) \\ Y_1(z) &= E_0(z^2) - z^{-1}E_1(z^2) \end{aligned} \quad (18)$$

2-parallel FFA da chiqishlar $Y_0(z)$ va $Y_1(z)$ ko'rinishida aniqlanib, ular $E_0(z^2)$ va $E_1(z^2)$ subfiltrlar kombinatsiyasidan hosil qilinadi. Shu transformatsiya multiplikatorlarni qisqartirish va parallel chiqishni ta'minlashning asosiy mexanizmini tashkil qiladi.

$$\begin{aligned} M_{2P} &= 3 \cdot \frac{N}{2} = \frac{3N}{2} \\ A_{2P} &= 3 \left(\frac{N}{2} - 1\right) + 4 \end{aligned} \quad (19)$$

Blok hajmi $L = 3$ bo'lganda FIR filtr ko'p fazali dekompozitsiya yordamida uchta subfiltrga ajratiladi. Bu usulda bitta kirishdan uchta chiqish namunasi hosil qilinadi. Shu orqali hisoblash samaradorligi oshadi va multiplikatorlar soni kamayadi.

$$H(z) = E_0(z^3) + z^{-1}E_1(z^3) + z^{-2}E_2(z^3) \quad (20)$$

3-parallel tuzilishda chiqishlar quyidagicha aniqlanadi

$$\begin{aligned} Y_0(z) &= E_0(z^3) + z^{-1}E_1(z^3) + z^{-2}E_2(z^3) \\ Y_1(z) &= E_0(z^3) + \alpha \cdot z^{-1}E_1(z^3) + \alpha^2 \cdot z^{-2}E_2(z^3) \\ Y_2(z) &= E_0(z^3) + \alpha^2 \cdot z^{-1}E_1(z^3) + \alpha \cdot z^{-2}E_2(z^3) \end{aligned} \quad (21)$$

bu yerda $\alpha = e^{-j2\pi/3}$

Natijalar

Quyidagi 1 - jadval An'anaviy multiplikatorlar ustunida kiritgan qiymatlarga qarab $4 \cdot N$ ko'rinishida ifodalangan ($N=25 \rightarrow 100$; $N=500 \rightarrow 2000$). Shu sababli "FIR (simmetrik) multiplikatorlar" qiymatlarini to'g'ri talqin qilish uchun butunlay N bilan yoki An'anaviy bilan solishtirishda bu skeylni hisobga olish lozim.

1-jadval

Filtr uzunligi (N)	FIR (simmetrik) multiplikatorlar	An'anaviy multiplikatorlar	Parallel CPU tezligi (relativ)	Parallel GPU tezligi (relativ)	CPU energiyasi (%)	GPU energiyasi (%)
25.0	50.99	100.0	1.2	1.75	99.5	99.333
50.0	99.45	200.0	1.4	2.0	99.0	98.667
75.0	153.89	300.0	1.6	2.25	98.5	98.0
100.0	212.18	400.0	1.8	2.5	98.0	97.333
125.0	247.66	500.0	2.0	2.75	97.5	96.667
150.0	297.19	600.0	2.2	3.0	97.0	96.0
175.0	372.11	700.0	2.4	3.25	96.5	95.333
200.0	412.28	800.0	2.6	3.5	96.0	94.667
225.0	441.55	900.0	2.8	3.75	95.5	94.0
250.0	510.85	1000.0	3.0	4.0	95.0	93.333
275.0	539.80	1100.0	3.2	4.25	94.5	92.667
300.0	588.82	1200.0	3.4	4.5	94.0	92.0
325.0	656.29	1300.0	3.6	4.75	93.5	91.333
350.0	646.43	1400.0	3.8	5.0	93.0	90.667
375.0	698.25	1500.0	4.0	5.25	92.5	90.0
400.0	782.01	1600.0	4.2	5.5	92.0	89.333
425.0	815.56	1700.0	4.4	5.75	91.5	88.667
450.0	911.31	1800.0	4.6	6.0	91.0	88.0
475.0	915.50	1900.0	4.8	6.25	90.5	87.333
500.0	943.51	2000.0	5.0	6.5	90.0	86.667

FIR (simmetrik) multiplikatorlar An'anaviy multiplikatorlarga nisbatan taxminan 47–51% atrofida joylashgan. Ya'ni, siz kiritgan an'anaviy ko'rsatkichlar ($4 \cdot N$) nazariy jihatdan biror blok/ko'p chiqishga qarab kengaytirilgan bo'lsa, simmetrik FIR struktura undan yarimga kamaygan multiplikator talab qiladi. Bu o'zaro nisbat simmetriyaning multiplikator talabini sezilarli kamaytirishini qo'llab-quvvatlaydi. Parallel CPU tezligi (relativ) N oshishi bilan muntazam ravishda ortadi: jadval boshida 1.2 dan oxirida 5.0 gacha. Bu umumiylikda $4.17 \times$ ga ko'payishni ko'rsatadi ($5.0/1.2 \approx 4.17$). Parallel GPU tezligi ham oshadi: $1.75 \rightarrow 6.5$, ya'ni $\approx 3.71 \times$ o'sish ($6.5/1.75 \approx 3.71$).

Katta N qiymatlarida parallelizatsiya (ayniqsa GPU) hisoblash tezligini sezilarli oshiradi; GPU uchun boshlang'ich ustunlik yuqori bo'lsada, CPU tezligi nisbatan ko'proq chiziqli o'sish ko'rsatgan.

CPU energiyasi 99.5% dan 90.0% gacha pasaydi ya'ni ≈ 9.5 pp kamayish. Bu boshlang'ich qiymatga nisbatan $\approx 9.6\%$ kamayish demak. GPU energiyasi (%) 99.333% dan 86.667% gacha pasaygani ya'ni ≈ 12.67 pp kamayish ($\approx 12.8\%$ nisbiy kamayish). GPU asosida parallel ishlov energiya samaradorligini CPUga nisbatan ko'proq yaxshilaydi (jadval bo'yicha GPU energiya pasayishi kattaroq). Barcha metriklar (tezlik va energiya) doimiy va monotond o'zgarish ko'rsatadi: N oshishi bilan tezlik ortadi, energiya kamayadi, FIR multiplikator/An'anaviy nisbat esa biroz kamayuvchi tendensiyaga ega (FIR/An'anaviy nisbati ozgina tushadi).

Xulosa

Maqolada chiziqli filtrlar asosida raqamli signallarni qayta ishlash uchun samarali parallel algoritmlar ishlab chiqildi. FIR va IIR filtrlari uchun matematik modellar asosida tahlil qilinib, IIR ni FIR ga yaqinlashtirish yondashuvlari ko'rib chiqildi.

Parallel hisoblash tezligi filtr uzunligi ortgani sayin oshib borgan: CPUda 1.2 dan 5.0 gacha, GPUda esa 1.75 dan 6.5 gacha ko'tarilgan. Demak, katta o'lchamli filtrlar uchun parallelizatsiya ancha foydali.

Energiya samaradorligi ham yaxshilangan: CPU energiya sarfi 99.5% dan 90% gacha, GPU esa 99.3% dan 86.7% gacha pasaygan. Bu esa GPU asosidagi parallel ishlov berishning energiya tejamliligini ko'rsatadi.

Ko'p fazali dekompozitsiya va FFA algoritmi yordamida hisoblash resurslari optimallashtirildi, multiplikatorlar soni kamaytirildi va real vaqt tizimlarida ishlash samaradorligi oshirildi. Natijalar katta hajmdagi ma'lumotlarni qayta ishlash jarayonini tezkor va energiya tejamlor tarzda amalga oshirish imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati

- [1]. Sung W., Mitra S. K., Jeren B. Multiprocessor implementation of digital filtering algorithms using a parallel block processing method //IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems. – 1992. – T. 3. – №. 01. – C. 110-120.
- [2]. Ботиров Т. В. и др. Синтез интервальных управляющих устройств в адаптивные системы управления с эталонной моделью //Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. – 2020. – С. 231-234.
- [3]. Parker D. A., Parhi K. K. Low-area/power parallel FIR digital filter implementations //Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology. – 1997. – T. 17. – №. 1. – C. pp. 75-92.
- [4]. Kalandarov I. I., Namozov N. N. Yer osti konlarida xodimlarni xavfsizligini ta'minlash individual qurilmalaridagi signallar kechikish vaqtini aniqlash modeli //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2024. – №. 1. – C. 33-36.
- [5]. Kalandarov I., Namozov N., Bozorov B. Analyses and algorithms of personnel safety in mines using event tree and Bayesian network method //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – T. 531. – C. 03018.
- [6]. Neubauer A. Non-linear adaptive filters based on genetic algorithms with applications to digital signal processing //Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. – IEEE, 1995. – T. 2. – C. 527-532.
- [7]. Kalandarov I.I., Namozov N.N., Nasimov R. Testing the Technology and Reliability of Using the Zigbee Network in Underground Mining Operations. In: Koucheryavy, Y., Aziz, A. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. ruSMART NEW2AN 2024 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15555. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95296-8_14

- [8]. Giampiccolo R. et al. Parallel wave digital filter implementations of audio circuits with multiple nonlinearities //AES. – 2022. – T. 70. – №. 6. – C. 469-484.
- [9]. Kalandarov I., Namozov N.N. LoRa signallari yordamida yer osti kon ishlarida xodimlar harakatlanish traektoriyasini aniqlash modeli //Digital transformation and artificial intelligence. – 2023. – T. 1. – №. 4. – C. 146-148.
- [10]. Kalinli A., Karaboga N. A parallel tabu search algorithm for digital filter design //COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. – 2005. – T. 24. – №. 4. – C. 1284-1298.
- [11]. Vakhromeev A. G. et al. Geoeological monitoring of the “Mustaqillikning 25 yilligi” gas field //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – T. 417. – C. 04007.
- [12]. Kalandarov I., Namozov N., Bozorov B. Yer osti kon ishlarida xodimlar xavfsizligini ta'minlash tizimlari tahlili //Innovatsion texnologiyalar. – 2023. – T. 52. – №. 04.
- [13]. Felderhoff T. Jacobi's method for massive parallel wave digital filter algorithm //1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Conference Proceedings. – IEEE, 1996. – T. 3. – C. 1621-1624.
- [14]. Kabulov A. et al. Control System and Algorithm for Construction of Optimal Technological Routes for Machining Parts in the Machining Shop //International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry “Interagromash”. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – C. 2566-2574.
- [15]. Каландаров И.И. и др. Преобразователь передачи информации в информационную систему контроля горюче-смазочных материалов //Journal of advances in engineering technology. – 2022. – №. 3. – C. 5-8.
- [16]. Balasubramaniam S., Bharathi R. Performance analysis of parallel FIR digital filter using VHDL //International Journal of Computer Applications. – 2012. – T. 39. – №. 9. – C. 1-6.
- [17]. Namozov N. N. Tog '-kon sanoatida piyodalar va transport vositalari o 'rtasida to 'qnashuvlarini oldini olish usullari va sun'iy intellekt texnologiyasining o 'rni //Indexing. – 2024. – T. 1. – №. 1.
- [18]. Ma J., Parhi K. K., Deprettere E. F. A unified algebraic transformation approach for parallel recursive and adaptive filtering and SVD algorithms //IEEE transactions on signal processing. – 2001. – T. 49. – №. 2. – C. 424-437.
- [19]. Namozov N. N. Database and Structure Modeling of Personnel Safety Management Information System //Indexing. – 2024. – T. 1. – №. 1.
- [20]. Hegde R., Shanbhag N. R. Soft digital signal processing //IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems. – 2002. – T. 9. – №. 6. – C. 813-823.
- [21]. Намозов Н. Н. Анализ систем предотвращения столкновений транспортных средств на подземных месторождениях //Ответственный редактор. – 2024. – C. 60.
- [22]. Schafer R. W., Rabiner L. R. A digital signal processing approach to interpolation //Proceedings of the IEEE. – 2005. – T. 61. – №. 6. – C. 692-702.
- [23]. Namozov N. N. Kon sanoatida xodimlar xavfsizligini ta'minlashda xavf omillarini ekstrapolyatsion tahlil asosidagi matematik modeli //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2024. – №. 3. – C. 126-130.
- [24]. Namozov N. N. Datchik qurilmalaridan olingan ma'lumotlarni qayta ishlashda neyron tarmoqlarining matematik va cnn arxitektura modellar tahlili //International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2025. – T. 6. – №. 1. – C. 68-75.
- [25]. Дустов А. Ш., Намозов Н. Н., Дустова М. П. Разработка системы компенсации пульсаций с применением интеллектуального анализа для повышения точности измерения расхода жидкости //Multidisciplinary Journal of Science and Technology. – 2025. – T. 5. – №. 5. – C. 599-604.
- [26]. Djigan V. I. RLS adaptive filtering algorithms based on parallel computations //radioengineering-prague-. – 2005. – T. 14. – №. 3. – C. 28.

- [27]. Kalandarov I. I., Namozov N. N. A model for ensuring the safety of personnel operating in underground mines using the linear extrapolation method //International conference on analysis of mathematics and exact sciences. – 2024. – T. 1. – №. 1. – C. 121-125.
- [28]. Schafer R. W., Rabiner L. R. A digital signal processing approach to interpolation //Proceedings of the IEEE. – 2005. – T. 61. – №. 6. – C. 692-702.
- [29]. Kalandarov I.I., Khojiev A.H., Namozov, N.N., & Khayrullayev, M. Mathematical Model and Algorithm for Calculating Natural and Geological Conditions Affecting the Safety of Workers in Underground Mining //Proceedings of the 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems. – 2024. – C. 394-397.