

TIBBIY MONITORING QURILMALARIDA O'RNATILGAN TIZIMLAR ASOSIDA REAL VAQTLI SIGNAL TAHLILINI TAKOMILLASHTIRISH

Pirmatov Elyorbek Erkinjon o'g'li
Mamajanov Xushnodbek Ro'ziboy o'g'li

Farg'ona Davlat texnika universiteti
Axborot texnologiyalari va telekommunikatsiya fakulteti
Suniy Intelekt yo'nalishi 3-bosqich 72-23SI-guruh talabasi.

Abdulxamidov Azizjon Abdulla o'g'li

Farg'ona Davlat texnika universiteti, Axborot texnologiyalari va telekommunikatsiya fakulteti,
Kompyuter muhandisligi va sun'iy intellekt kafedrasida dotsenti, PhD.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20030602>

***Annotatsiya.** Mazkur ilmiy maqolada tibbiy monitoring qurilmalarida o'rnatilgan tizimlar asosida real vaqtli fiziologik signallarni tahlil qilish jarayonini takomillashtirish masalalari IMRAD talablari asosida yoritiladi. Bugungi kunda yurak urishi, elektrokardiogramma, qondagi kislorod miqdori, tana harorati, qon bosimi va nafas olish chastotasi kabi muhim biometrik ko'rsatkichlarni uzluksiz kuzatish zamonaviy tibbiyotning muhim yo'nalishlaridan biriga aylangan. Ayniqsa, masofaviy tibbiy xizmat, surunkali kasalliklarni nazorat qilish, keksalar salomatligini kuzatish va favqulodda holatlarni erta aniqlashda o'rnatilgan tizimlar asosidagi tibbiy monitoring qurilmalari katta ahamiyat kasb etadi. Tadqiqotda real vaqtli signal tahlilining asosiy bosqichlari — signalni yig'ish, filtrlash, shovqinni kamaytirish, xususiyatlarni ajratib olish, anomaliyalarni aniqlash va qaror qabul qilish jarayonlari ilmiy jihatdan tahlil qilinadi. Shuningdek, maqolada edge computing, TinyML, mashinaviy o'rganish va kam quvvatli mikrokontrollerlar asosida tibbiy monitoring tizimlarining tezkorligi, aniqligi va energiya samaradorligini oshirish yo'llari ko'rib chiqiladi. Zamonaviy tadqiqotlarda wearable biosensorlar va IoT tibbiy qurilmalari EKG, SpO₂ va tana harorati kabi signallarni uzluksiz real vaqt rejimida monitoring qilish imkonini berayotgani qayd etiladi.*

Tahlillar shuni ko'rsatadiki, tibbiy monitoring qurilmalarida real vaqtli signal tahlilini takomillashtirish uchun faqat sensor aniqligini oshirish yetarli emas. Bunda signalni qayta ishlash algoritmlari, apparat resurslari, energiya sarfi, ma'lumot xavfsizligi va diagnostik qaror ishonchliligi birgalikda hisobga olinishi lozim. Maqola yakunida real vaqtli tibbiy monitoring tizimlari uchun kompleks optimallashtirish yondashuvi taklif etiladi.

***Kalit so'zlar:** o'rnatilgan tizimlar, tibbiy monitoring, real vaqtli signal tahlili, EKG, SpO₂, yurak urishi, fiziologik signal, biosensor, edge computing, TinyML, mashinaviy o'rganish, IoT, anomaliya aniqlash, signal filtrlash, sog'liqni masofadan kuzatish.*

***Аннотация.** В данной научной статье рассматриваются вопросы совершенствования анализа физиологических сигналов в режиме реального времени на основе встроенных систем в медицинских мониторинговых устройствах. В современных условиях непрерывный контроль таких важных биометрических показателей, как электрокардиограмма, частота сердечных сокращений, уровень насыщения крови кислородом, артериальное давление, температура тела и частота дыхания, является одним из актуальных направлений цифровой медицины.*

В исследовании научно анализируются основные этапы обработки медицинских сигналов: сбор данных с биосенсоров, предварительная фильтрация, снижение уровня шумов и артефактов, выделение информативных признаков, обнаружение аномалий и принятие решений в реальном времени.

Особое внимание уделяется применению встроенных систем, технологий edge computing, TinyML и алгоритмов машинного обучения для повышения точности, быстродействия и энергоэффективности медицинских устройств.

Результаты анализа показывают, что для эффективного функционирования медицинских мониторинговых устройств недостаточно только высокой точности сенсоров. Необходимо комплексно учитывать качество сигнала, вычислительные ресурсы устройства, энергопотребление, задержку обработки данных, надежность диагностического решения и безопасность медицинской информации. Предложенный подход способствует повышению эффективности дистанционного медицинского мониторинга, раннему выявлению опасных состояний и улучшению качества медицинского обслуживания.

Ключевые слова: встроенные системы, медицинский мониторинг, анализ сигналов в реальном времени, электрокардиограмма, ЭКГ, SpO₂, частота сердечных сокращений, физиологический сигнал, биосенсор, edge computing, TinyML, машинное обучение, Интернет вещей, обнаружение аномалий, цифровая медицина.

Abstract. This scientific article examines the improvement of real-time physiological signal analysis based on embedded systems in medical monitoring devices. In modern healthcare, continuous monitoring of important biometric indicators such as electrocardiogram, heart rate, blood oxygen saturation, blood pressure, body temperature, and respiratory rate has become one of the key directions of digital medicine.

The study scientifically analyzes the main stages of medical signal processing, including biosensor-based data acquisition, preprocessing, noise and artifact reduction, feature extraction, anomaly detection, and real-time decision-making. Special attention is given to the use of embedded systems, edge computing, TinyML, and machine learning algorithms to improve the accuracy, speed, and energy efficiency of medical monitoring devices.

The analysis shows that high sensor accuracy alone is not sufficient for the effective operation of medical monitoring systems. It is necessary to consider signal quality, device computational resources, energy consumption, data processing latency, diagnostic decision reliability, and medical data security in an integrated manner. The proposed approach contributes to improving remote medical monitoring, early detection of critical health conditions, and enhancing the quality of healthcare services.

Keywords: embedded systems, medical monitoring, real-time signal analysis, electrocardiogram, ECG, SpO₂, heart rate, physiological signal, biosensor, edge computing, TinyML, machine learning, Internet of Things, anomaly detection, digital healthcare.

Kirish

So‘nggi yillarda raqamli tibbiyot, masofaviy monitoring va aqlli tibbiy qurilmalar inson salomatligini nazorat qilishda muhim texnologik yo‘nalishlardan biriga aylandi. An‘anaviy tibbiy kuzatuv ko‘pincha bemorning shifoxonaga kelishi, maxsus laboratoriya yoki diagnostika qurilmalaridan foydalanishi orqali amalga oshirilgan bo‘lsa, zamonaviy o‘rnatilgan tizimlar bemor holatini uzluksiz, real vaqt rejimida va masofadan kuzatish imkonini bermoqda.

O‘rnatilgan tizimlar — bu ma‘lum bir vazifani bajarishga mo‘ljallangan apparat va dasturiy ta‘minot majmuasidir. Tibbiy monitoring qurilmalarida ular sensorlardan kelayotgan fiziologik signallarni qabul qiladi, ularni qayta ishlaydi, tahlil qiladi va zarur holatlarda ogohlantirish beradi.

Bunday qurilmalarga aqlli soatlar, yurak urishini o'lovchi bilaguzuklar, portativ EKG qurilmalari, pulsoksimetrlar, glyukoza monitoring tizimlari, qon bosimi o'lvchagichlar va bemor holatini masofadan kuzatuvchi IoT qurilmalari kiradi.

Tibbiy monitoring qurilmalarida ishlatiladigan signallar inson organizmidagi muhim fiziologik jarayonlarni aks ettiradi. Masalan, EKG yurakning elektr faolligini ko'rsatadi, SpO₂ qondagi kislorod bilan to'yinganlik darajasini bildiradi, PPG signali qon oqimining optik o'zgarishlarini ifodalaydi, tana harorati va nafas olish chastotasi esa umumiy fiziologik holat haqida ma'lumot beradi. Ushbu signallarni real vaqt rejimida to'g'ri tahlil qilish yurak-qon tomir kasalliklari, nafas olish buzilishlari, gipoksiya, aritmiya va boshqa xavfli holatlarni erta aniqlash imkonini beradi.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, zamonaviy wearable tibbiy texnologiyalarda sun'iy intellekt va edge computing yondashuvlari muhim o'rin tutmoqda. Edge-AI asosidagi arxitekturalar EKG, SpO₂ va tana harorati kabi hayotiy ko'rsatkichlarni markaziy serverga to'liq bog'lanmagan holda, lokal yoki yaqin hisoblash tugunlarida qayta ishlash imkonini beradi. Bu esa real vaqtli monitoringda kechikishni kamaytirish, tarmoq yukini pasaytirish va bemor ma'lumotlari maxfiyligini oshirishga xizmat qiladi.

Biroq tibbiy monitoring qurilmalarida real vaqtli signal tahlilini amalga oshirish bir qator murakkab muammolar bilan bog'liq. Birinchidan, fiziologik signallar ko'pincha shovqinli bo'ladi. Harakat, teri-elektrod aloqasi, elektromagnit aralashuv, noto'g'ri joylashtirilgan sensor yoki tashqi muhit omillari signal sifatini pasaytiradi. Ikkinchidan, o'rnatilgan qurilmalar cheklangan protsessor quvvati, xotira hajmi va batareya resursiga ega. Uchinchidan, tibbiy monitoringda noto'g'ri qaror bemor salomatligi uchun xavf tug'dirishi mumkin. Shu sababli signal tahlili algoritmlari nafaqat tezkor, balki ishonchli va tibbiy jihatdan asoslangan bo'lishi kerak.



Mazkur maqolaning asosiy maqsadi — tibbiy monitoring qurilmalarida o'rnatilgan tizimlar asosida real vaqtli signal tahlilini takomillashtirish usullarini ilmiy jihatdan tahlil qilish, mavjud muammolarni aniqlash hamda samarali algoritmik va texnologik yechimlarni asoslab berishdan iborat.

Metodlar

Ushbu tadqiqotda tibbiy monitoring qurilmalarida real vaqtli signal tahlilini o‘rganish uchun tizimli tahlil, solishtirma tahlil, algoritmik baholash va konseptual modellashtirish usullaridan foydalanildi. Tadqiqot predmeti sifatida o‘rnatilgan tizimlar asosida ishlovchi tibbiy monitoring qurilmalarida fiziologik signallarni yig‘ish, qayta ishlash va tahlil qilish jarayoni olindi.

Birinci bosqichda tibbiy monitoring tizimlarining umumiy arxitekturasi tahlil qilindi.

Bunday tizim odatda quyidagi komponentlardan tashkil topadi: biosensor, analog-raqamli o‘zgartirgich, mikrokontroller yoki mikroprotessor, signalni qayta ishlash moduli, xotira, aloqa moduli va foydalanuvchi interfeysi. Sensor fiziologik parametrlarni o‘lchaydi, analog-raqamli o‘zgartirgich uni raqamli signalga aylantiradi, mikrokontroller esa signalni filtrlash, tahlil qilish va qaror chiqarish vazifalarini bajaradi.

Ikkinchi bosqichda tibbiy signallar turlari o‘rganildi.

Tibbiy monitoring tizimida ishlatiladigan asosiy fiziologik signallar va sensorlar

Signal turi	O‘lchanadigan parametr	Asosiy sensor	Tibbiy ahamiyati
EKG	Yurak elektr faolligi	EKG elektrodlar	Aritmiya va yurak holatini aniqlash
PPG	Qon oqimidagi optik o‘zgarish	Optik sensor	Puls va qon aylanishini kuzatish
SpO ₂	Qondagi kislorod to‘yinganligi	Pulsoksimetr sensori	Gipoksiya va nafas olish holatini baholash
Harorat	Tana harorati	Termal sensor	Infeksiya yoki isitmani aniqlash
Nafas olish	Nafas chastotasi	Nafas sensori	Nafas buzilishlarini aniqlash
Qon bosimi	Arterial bosim	Bosim sensori	Gipertoniya va yurak-tomir xavfini nazorat qilish

Bu jadval metodologik asosni mustahkamlaydi va qaysi sensor qaysi fiziologik ko‘rsatkich uchun ishlatilishini aniq ko‘rsatadi.

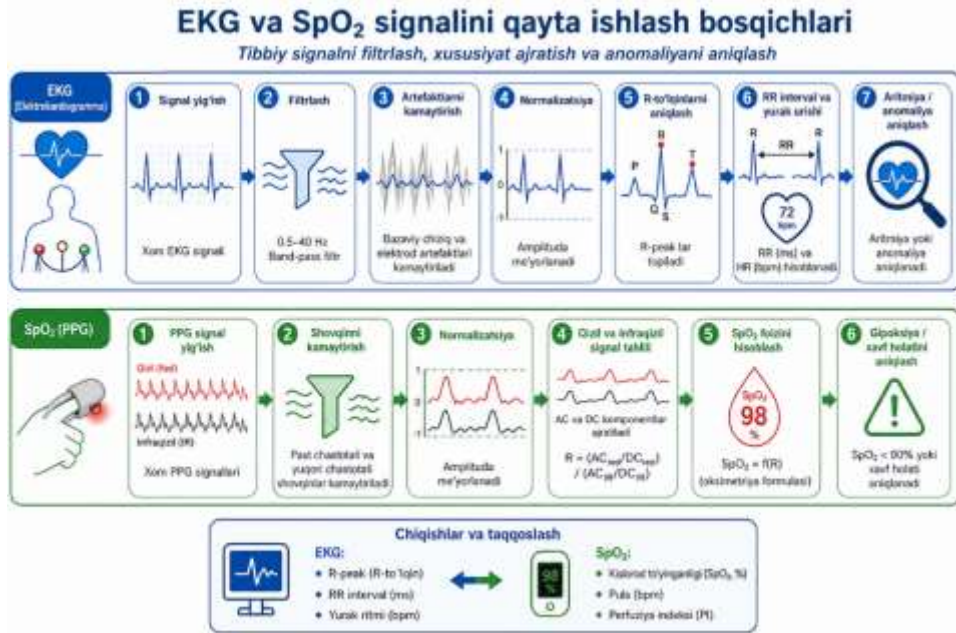
Asosiy e‘tibor EKG, PPG, SpO₂, yurak urishi, qon bosimi, tana harorati va nafas olish signallariga qaratildi. EKG signalini tahlil qilishda R-to‘lqinlarni aniqlash, yurak urish oralig‘ini hisoblash, ritm buzilishlarini aniqlash va aritmiya belgilarini ajratish muhim ahamiyatga ega.

PPG va SpO₂ signallarida esa optik sensorlardan keluvchi signallar asosida puls, qon oqimi va kislorod bilan to‘yinganlik darajasi baholanadi.

Uchinchi bosqichda real vaqtli signal qayta ishlash algoritmlari tahlil qilindi. Bunda past chastotali va yuqori chastotali shovqinlarni kamaytirish uchun raqamli filtrlash, harakat artefaktlarini pasaytirish, signal normalizatsiyasi, segmentatsiya, xususiyatlarni ajratib olish va anomaliyalarni aniqlash bosqichlari o‘rganildi. EKG monitoring tizimlariga bag‘ishlangan keng qamrovli sharhlarda bunday tizimlar arxitekturasi, signalni qayta ishlash jarayonlari va monitoring mexanizmlarini tizimli tasniflash muhimligi ko‘rsatilgan.

To‘rtinchi bosqichda mashinaviy o‘rganish va TinyML yondashuvlarining o‘rnatilgan tibbiy qurilmalarda qo‘llanish imkoniyatlari baholandi. TinyML kichik hajmli mashinaviy o‘rganish modellarini mikrokontrollerlar va kam quvvatli qurilmalarda ishga tushirishga qaratilgan yondashuv bo‘lib, real vaqtli tibbiy monitoringda muhim ahamiyatga ega. TinyML bo‘yicha tadqiqotlarda bunday tizimlarda aniqlikni saqlash, kichik resursli qurilmalarga modelni joylashtirish, hisoblash quvvatini optimallashtirish va ishonchlilikni oshirish asosiy muammolar sifatida ko‘rsatiladi.

- Beshinchi bosqichda takomillashtirilgan real vaqtli signal tahlili modeli ishlab chiqildi.
- Ushbu model quyidagi ketma-ket bosqichlarga asoslandi:
- Signalni yig'ish — biosensorlar orqali fiziologik parametrlarni o'lchash.
- Oldindan qayta ishlash — shovqinni kamaytirish, signalni filtrlash va normallashtirish.
- Xususiyatlarni ajratish — yurak urishi, RR interval, SpO₂ darajasi, amplituda va chastota kabi belgilarni aniqlash.
- Anomaliya aniqlash — normal holatdan chetlanishni aniqlash.
- Qaror qabul qilish — xavf darajasini baholash va ogohlantirish berish.
- Ma'lumot uzatish — natijalarni mobil ilova, server yoki shifokor paneliga yuborish.
- Energiya optimallashtirish — sensor va protsessor faoliyatini talabga qarab boshqarish.



2-rasm. EKG va SpO₂ signalini real vaqt rejimida qayta ishlash bosqichlari

Natijalar

Tahlil natijalari tibbiy monitoring qurilmalarida real vaqtli signal tahlilining samaradorligi asosan uchta omilga bog'liqligini ko'rsatdi: signal sifati, algoritim samaradorligi va apparat resurslarining optimal boshqarilishi.

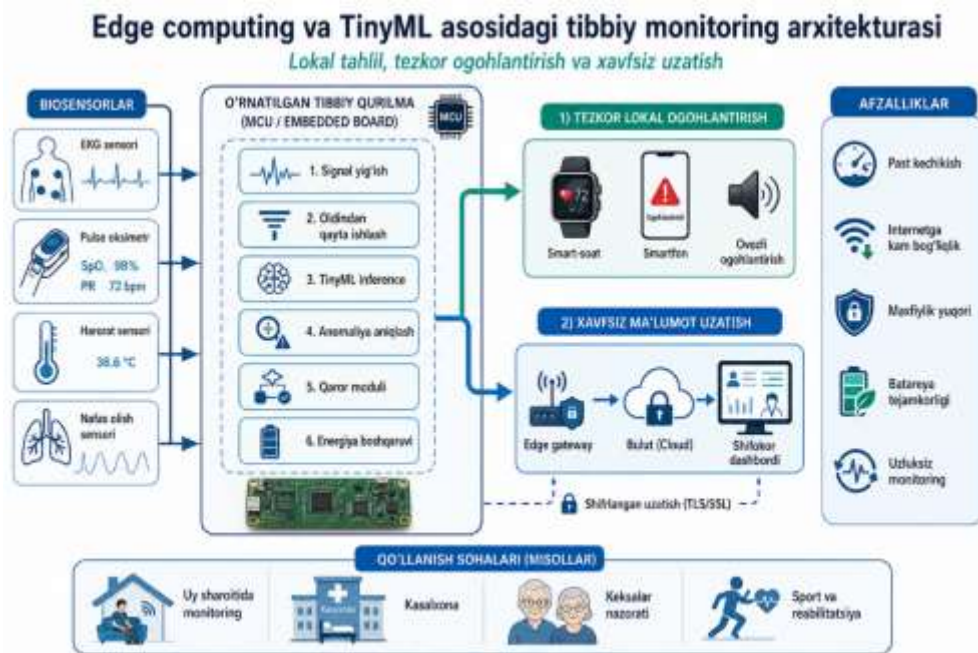
Birinchi natija signal sifatining hal qiluvchi ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatadi. Tibbiy monitoring qurilmalarida sensorlardan olinadigan signal doimo ideal bo'lmaydi. Masalan, EKG signalida elektrodning teriga noto'g'ri birikishi, bemorning harakati, mushak faolligi va elektr shovqinlar natijasida artefaktlar paydo bo'ladi. PPG signalida esa qo'l harakati, teri rangi, sensor bosimi va tashqi yorug'lik signal sifatiga ta'sir qiladi. Shu sababli real vaqtli tahlilda signalni filtrlash va artefaktlarni kamaytirish algoritmlari muhim o'rin tutadi.

Ikkinchi natija shundan iboratki, tibbiy monitoring qurilmalarida signalni faqat yig'ish emas, balki uni lokal darajada tahlil qilish zarur. Agar har bir signal markaziy serverga yuborilsa, tarmoq kechikishi, aloqa uzilishi yoki server yuklamasi sababli ogohlantirish kechikishi mumkin.

Edge computing asosida esa signal qurilmaning o'zida yoki unga yaqin hisoblash tugunida qayta ishlanadi. Bu real vaqtli tibbiy monitoringda tezkor javob qaytarish imkonini beradi. AI va edge computing integratsiyasiga bag'ishlangan tadqiqotlarda wearable health texnologiyalari bemor holatini uzluksiz tahlil qilish va tibbiy xizmatlarni markazlashmagan shaklda rivojlantirish imkonini berishi ta'kidlanadi.

Uchinchi natija TinyML texnologiyasining tibbiy monitoring qurilmalari uchun istiqbolli ekanligini ko'rsatdi. TinyML yordamida kichik hajmli model bevosita mikrokontrollerda ishlashi mumkin. Bu esa signalni real vaqt rejimida tahlil qilish, internetga doimiy bog'lanmasdan qaror chiqarish va batareya sarfini kamaytirish imkonini beradi. 2025-yilda real vaqqli cardio-exercise monitoring bo'yicha tadqiqotda TinyML wearable qurilmalarga sensor ma'lumotlarini mustaqil qayta ishlash va real vaqt rejimida javob berish imkonini berishi, bu esa uzluksiz sog'liq monitoringi uchun ayniqsa muhim ekani qayd etilgan.

To'rtinchi natija algoritmik optimallashtirish zarurligini ko'rsatadi. Tibbiy monitoring qurilmalarida mashinaviy o'rganish modeli juda katta bo'lsa, u mikrokontroller xotirasiga sig'masligi yoki real vaqt talablariga javob bermasligi mumkin. Shuning uchun model compression, quantization, pruning va feature selection kabi usullar qo'llanilishi kerak. Bu usullar model hajmini kamaytiradi, hisoblash vaqtini qisqartiradi va energiya sarfini kamaytiradi.



3-rasm. Edge computing va TinyML asosidagi tibbiy monitoring arxitekturasi.

Beshinchi natija tibbiy monitoring tizimlarida xavfsizlik va maxfiylik ham real vaqqli tahlil bilan birga ko'rilishi kerakligini ko'rsatadi.

Real vaqqli tibbiy signal tahlilining asosiy bosqichlari

Bosqich	Asosiy vazifasi	Qo'llaniladigan usullar	Kutiladigan natija
Signal yig'ish	Fiziologik parametrlarni o'lchash	EKG, PPG, SpO ₂ , harorat sensorlari	Dastlabki biometrik ma'lumot
Filtrlash	Shovqin va artefaktlarni kamaytirish	Raqamli filtrlar, adaptiv filtrlar	Tozaroq signal
Xususiyat ajratish	Diagnostik belgilarni aniqlash	RR interval, amplituda, chastota, SpO ₂ foizi	Tahlil uchun muhim parametrlar
Anomaliya aniqlash	Normal holatdan chetlanishni topish	ML, threshold, TinyML, statistik	Xavfli holatlarni erta aniqlash

		usullar	
Qaror chiqarish	Tibbiy holatni baholash	Qoidaviy algoritim, ML modeli	Ogohlantirish yoki tavsiya
Ma'lumot uzatish	Natijani foydalanuvchiga yetkazish	Bluetooth, Wi-Fi, IoT protokollari	Shifokor yoki bemorga xabar
Energiya boshqaruvi	Batareya sarfini kamaytirish	Sleep mode, duty cycling, edge inference	Uzoq muddatli ishlash

Tibbiy signallar shaxsiy va sezgir ma'lumotlar hisoblanadi. Shu sababli qurilma va server o'rtasidagi aloqa shifrlanishi, foydalanuvchi autentifikatsiyasi ta'minlanishi va ma'lumotlar faqat ruxsat etilgan subyektlarga uzatilishi kerak. Ayniqsa, IoT asosidagi tibbiy qurilmalar soni ortib borayotgani sababli kiberxavfsizlik masalasi yanada dolzarb bo'lmoqda.

Quyidagi jadval real vaqtlı tibbiy signal tahlilida qo'llaniladigan asosiy bosqichlar va ularning vazifalarini umumlashtiradi:

Bosqich	Asosiy vazifasi	Qo'llaniladigan usullar	Kutiladigan natija
Signal yig'ish	Fiziologik parametrlarni o'lchash	EKG, PPG, SpO ₂ , harorat sensorlari	Dastlabki biometrik ma'lumot
Filtrlash	Shovqin va artefaktlarni kamaytirish	Raqamli filtrlar, adaptiv filtrlar	Tozaroq signal
Xususiyat ajratish	Diagnostik belgilarni aniqlash	RR interval, amplituda, chastota, SpO ₂ foizi	Tahlil uchun muhim parametrlar
Anomaliya aniqlash	Normal holatdan chetlanishni topish	ML, threshold, TinyML, statistik usullar	Xavfli holatlarni erta aniqlash
Qaror chiqarish	Tibbiy holatni baholash	Qoidaviy algoritim, ML modeli	Ogohlantirish yoki tavsiya
Ma'lumot uzatish	Natijani foydalanuvchiga yetkazish	Bluetooth, Wi-Fi, IoT protokollari	Shifokor yoki bemorga xabar
Energiya boshqaruvi	Batareya sarfini kamaytirish	Sleep mode, duty cycling, edge inference	Uzoq muddatli ishlash

Muhokama

Tibbiy monitoring qurilmalarida real vaqtlı signal tahlilini takomillashtirish masalasi faqat dasturiy algoritimni yaxshilash bilan cheklanmaydi. Bu masala sensor texnologiyasi, mikrokontroller arxitekturasi, signalni qayta ishlash algoritmlari, sun'iy intellekt modellari, energiya boshqaruvi, aloqa protokollari va ma'lumot xavfsizligining o'zaro integratsiyasini talab qiladi.

Birinchi muhim jihat — signalning ishonchliligi. Tibbiy monitoring qurilmasi noto‘g‘ri yoki shovqinli signalga asoslanib qaror chiqarsa, noto‘g‘ri ogohlantirish yoki xavfli holatni o‘tkazib yuborish ehtimoli paydo bo‘ladi. Masalan, EKG signalidagi artefakt aritmiya sifatida noto‘g‘ri talqin qilinishi mumkin. Shuning uchun real vaqtli tizimda signal sifatini baholash moduli bo‘lishi kerak. Bu modul signal sifati past bo‘lsa, foydalanuvchiga sensorni to‘g‘ri joylashtirish yoki o‘lchovni qayta bajarish haqida xabar berishi mumkin.

Ikkinchi jihat — real vaqt talabi. Tibbiy monitoringda kechikish oddiy texnik muammo emas, balki klinik ahamiyatga ega omildir. Yurak ritmi keskin buzilganda yoki kislorod saturatsiyasi xavfli darajaga tushganda tizim tezkor ogohlantirish berishi kerak. Shuning uchun tahlil algoritmlari kam vaqt ichida ishlashi, doimiy monitoring rejimida barqaror bo‘lishi va batareyani tez tugatmasligi lozim.

Uchinchi jihat — edge computing va bulutli hisoblash o‘rtasidagi muvozanatdir.

Real vaqtli tibbiy monitoring tizimlarining baholash mezonlari

Baholash mezonlari	Mazmuni	Tizimdagi ahamiyati
Latency	Qaror chiqishgacha bo‘lgan vaqt	Tezkor ogohlantirish uchun zarur
Accuracy	To‘g‘ri tahlil va tashxis darajasi	Noto‘g‘ri ogohlantirishlarni kamaytiradi
Signal sifati	Shovqinsiz va ishonchli signal	Tahlil aniqligini oshiradi
Energy consumption	Batareya sarfi	Wearable qurilmalar uchun muhim
Reliability	Barqaror ishlash	Uzoq muddatli monitoring uchun kerak
Privacy/Security	Ma’lumotni himoyalash	Tibbiy ma’lumotlar maxfiyligi uchun zarur

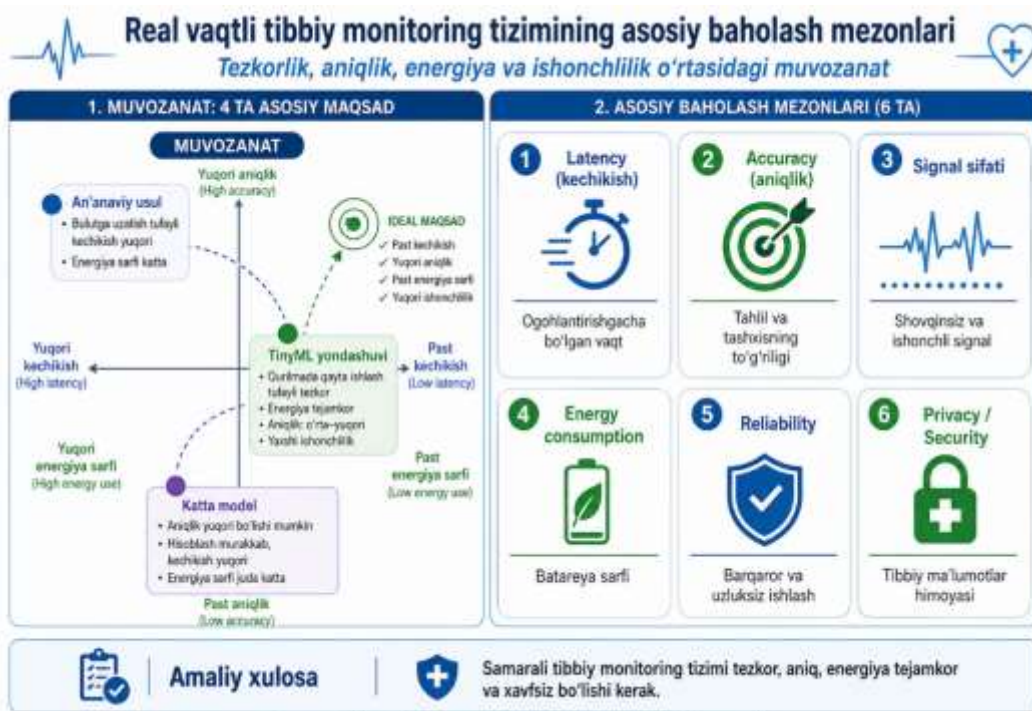
Lokal qurilmada tezkor qaror chiqarish xavfli holatlarda juda muhim. Biroq chuqur tahlil, uzoq muddatli statistik kuzatuv va shifokor paneli uchun bulutli tizim ham foydali.

Shu sababli eng maqbul yondashuv gibrid arxitektura hisoblanadi: tezkor va hayotiy muhim qarorlar qurilmaning o‘zida qabul qilinadi, batafsil tahlil va tarixiy ma’lumotlar esa serverda qayta ishlanadi.

To‘rtinchi jihat — TinyML va mashinaviy o‘rganish modellarining optimallashtirilgan qo‘llanishidir. Katta chuqur o‘rganish modellarini bevosita kichik tibbiy qurilmalarda ishlatish qiyin. Shu sababli modelni soddalashtirish, kvantlash va muhim xususiyatlarni tanlash zarur.

TinyML yondashuvi aynan shu muammoni hal qilishga xizmat qiladi, chunki u kam quvvatli qurilmalarda real vaqtli inference bajarishga imkon beradi.

Shu bilan birga, tibbiy qurilmalarda modelning aniqligi yetarlicha yuqori bo‘lishi, noto‘g‘ri manfiy natijalar kamaytirilishi va klinik validatsiya talablariga mos bo‘lishi kerak.



4-rasm. Real vaqqli tibbiy monitoring tizimining asosiy baholash mezonlari

Beshinchi jihat — ma'lumot xavfsizligi va maxfiylik. Tibbiy monitoring tizimlari bemorning yurak faoliyati, harorati, kislorod darajasi va boshqa shaxsiy sog'liq ma'lumotlarini qayta ishlaydi. Bunday ma'lumotlarning ruxsatsiz qo'lga kiritilishi bemor maxfiyligiga putur yetkazadi. Shu sababli real vaqqli tahlil tizimlarida shifrlangan aloqa, xavfsiz autentifikatsiya, lokal ma'lumotni minimallashtirish va zarur hollarda federated learning kabi yondashuvlarni qo'llash maqsadga muvofiq.

Tahlillar asosida tibbiy monitoring qurilmalarida real vaqqli signal tahlilini takomillashtirish uchun quyidagi kompleks yondashuv taklif etiladi:

Birinchidan, biosensordan olinadigan signal sifati doimiy baholab borilishi kerak.

Ikkinchidan, har bir signal turi uchun mos filtrlash algoritmlari tanlanishi zarur.

Uchinchidan, signal xususiyatlarini ajratib olish bosqichi soddalashtirilgan va tezkor bo'lishi lozim. To'rtinchidan, anomaliyalarni aniqlashda yengil mashinaviy o'rganish yoki TinyML modellaridan foydalanish maqsadga muvofiq. Beshinchidan, xavfli holatlarda qaror lokal qurilmada chiqarilishi, batafsil tahlil esa bulutli tizimda amalga oshirilishi kerak.

Oltinchidan, tizim energiya sarfini kamaytirish uchun adaptiv ishlash rejimiga ega bo'lishi lozim.

Xulosa

Tibbiy monitoring qurilmalarida o'rnatilgan tizimlar asosida real vaqqli signal tahlilini takomillashtirish zamonaviy raqamli tibbiyotning dolzarb ilmiy-amaliy masalalaridan biridir.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, EKG, SpO₂, PPG, tana harorati, qon bosimi va nafas olish kabi fiziologik signallarni real vaqt rejimida to'g'ri tahlil qilish bemor holatini uzluksiz nazorat qilish, xavfli holatlarni erta aniqlash va tibbiy yordam sifatini oshirish imkonini beradi.

Maqolada aniqlanishicha, real vaqqli signal tahlili samaradorligi signal sifati, filtrlash algoritmlari, xususiyatlarni ajratish usullari, mashinaviy o'rganish modellarining yengilligi, apparat resurslari va energiya boshqaruviga bevosita bog'liq.

Edge computing va TinyML yondashuvlari tibbiy monitoring qurilmalarida kechikishni kamaytirish, internetga bog'liqlikni pasaytirish va tezkor qaror qabul qilish imkonini beradi.

Shuningdek, tibbiy monitoring tizimlarida xavfsizlik va maxfiylik masalalari ham alohida e'tibor talab qiladi. Chunki bunday qurilmalar inson salomatligiga oid sezgir ma'lumotlar bilan ishlaydi. Shu sababli kelgusidagi tadqiqotlarda real vaqtli signal tahlili algoritmlarini klinik jihatdan validatsiya qilish, energiya samarador TinyML modellarini ishlab chiqish, xavfsiz IoT arxitekturalarini yaratish va adaptiv monitoring tizimlarini rivojlantirish muhim yo'nalishlar sifatida qaraladi.

Umuman olganda, o'rnatilgan tizimlar asosidagi tibbiy monitoring qurilmalari inson salomatligini doimiy nazorat qilish, kasalliklarni erta aniqlash va masofaviy tibbiy xizmatlarni rivojlantirishda katta imkoniyatlarga ega. Ularning samaradorligini oshirish esa real vaqtli signal tahlili algoritmlarini ilmiy asosda takomillashtirish bilan bevosita bog'liq.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Serhani M. A., El Kassabi H. T., Ismail H., Nujum Navaz A. ECG Monitoring Systems: Review, Architecture, Processes, and Key Challenges. 2020.
2. Ray P. P. A Review on TinyML: State-of-the-Art and Prospects. 2022.
3. Ashfaq Z. et al. Embedded AI-Based Digi-Healthcare. Applied Sciences, 2022.
4. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges. IEEE Internet of Things Journal, 2016.
5. Prabha M. et al. Edge-AI Integrated Secure Wireless IoT Architecture for Real-Time Healthcare Monitoring. 2025.
6. Xi L. et al. Integrating Wearable Health Devices with AI and Edge Computing. 2025.
7. Malche T. A TinyML Wearable System for Real-Time Cardio-Exercise Monitoring. 2025.
8. Tsoukas V. et al. A Review of Machine Learning and TinyML in Healthcare. 2021.
9. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016.
10. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson Education, 2021.