Aizhan Nurzhanova – Doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: nurzhanova_ab@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9871-9823.

Поступила в редакцию 06.04.2026
Поступила после доработки 07.06.2026
Принята к публикации 11.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-4

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 47.49.31

Н.П. Сапарходжаев[1], А. Хабай[2*], М.Ж. Иген[2], Е.А. Тулешов[2,3], Ж.Н. Исабеков[2]
[1]Рудный индустриалық университеті,
Рудный қ., Қостанай облысы, 50 лет Октябрь көшесі, 38
[2]Satbayev University,
050013, Қазақстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[3]Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
Қазақстан, Алматы, Шевченко көш., 28
[*]e-mail: a.khabay@satbayev.university

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ GNSS СИГНАЛДАРДЫҢ САПАСЫН ЖАҚСАРТУ ӘДІСТЕРІН ЖЕТІЛДІРУ

Аңдатпа: *Навигациялық спутниктік (GNSS) байланыс арнасында әлсіз сигнал жағдайында қабылдағыштың тасымалдаушы фазасы мен жиілігін дәл қадағалауы күрт нашарлап, навигациялық шешімнің тұрақтылығы мен сапасы төмендейді. Бұл жұмыстың мақсаты GNSS байланысындағы әлсіз сигналдың сапасын жақсарту, яғни төмен сападағы сигнал динамикалық әсерлер кезінде тасымалдаушыны автоматты реттеу жүйесінің сезімталдығын арттырып, фазалық/жиіліктік қателіктерді азайту. Зерттеу объектісі GNSS қабылдағышының коррелятор шығысындағы базалық жолақтағы I/Q сигнал және тасымалдаушыны қадағалау контур жұмысын зерттеу. Ұсынылған әдісте дәстүрлі ұзақ когерентті интеграцияның орнына блоктарға бөлінген когерентті интеграция (БКИ) қолданылады. жалпы интеграция уақыты T сақталып, сигнал B қысқа блокқа бөлінеді де, әр блок бойынша алынған I_b, Q_b нәтижелерінен матрицасы құрастырылады. Бұл матрица амплитуда-фаза өзгерістерін сақтап, жиілік сәйкессіздігі мен динамиканың әсерін дәлірек сипаттайды. Одан әрі Z[k] деректерін өңдейтін нейрондық желі дискриминаторы (CNN+MLP) фазалық қателікті бағалап, ол PI-тәрізді loop-filter арқылы сүзгіден өтіп, сандық басқарылатын генератор параметрлерін жабық кері байланыста жаңартады. Әдістің жаңалығы – БКИ ақпаратын 2D-матрица түрінде ұсынып, классикалық фазалық синхрондау кері байланыс дискриминаторын нейрондық дискриминатормен алмастыратын BCI-NPLL жабық құрылымы және сезімталдықты CRLB-фазалық джиттер байланысы арқылы сандық негіздеу. Модельдеу нәтижелері ұсынылған тәсілдің әлсіз сигнал аймағында қадағалау тұрақтылығын сақтайтынын, фазалық қателіктің нөл маңында шоғырланатынын және жиілікті бағалау дәлдігі жоғары екенін көрсетті (RMSE≈0.084Гц). Нәтижесінде әдіс GNSS байланысындағы әлсіз сигнал сапасын жақсартып, қабылдағыштың трекинг тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.*

Түйін сөздер: *GNSS, әлсіз сигнал, блоктық когерентті интеграция (БКИ), нейрондық PLL (NPLL), CNN дискриминатор, PI loop-filter, NCO, CRLB.*

Кіріспе

Жаһандық навигациялық жерсеріктік жүйелер (GNSS) көлік, авиация, робототехника, геодезия және смарт-құрылғылар сияқты көптеген салада негізгі позициялау технологиясына айналды [1-3]. Әлсіз GNSS сигналдарында тасымалдаушы ілмектің орнықтылығын арттыру үшін жиі Калман сүзгісі тәрізді бағалаушылармен күшейтілген құрылымдар ұсынылады [4]. Өйткені олар шу жағдайында күйді (фаза/жиілік) бірізді бағалауды жақсартады. Сонымен

©Н.П. Сапарходжаев, А. Хабай, М.Ж. Иген, Е.А. Тулешов, Ж.Н. Исабеков, 2026

қатар, әлсіз сигнал тек қуаттың азаюымен шектелмейді ионосфералық сцинтилляция сияқты құбылыстар амплитуда мен фазаның жылдам флуктуациясын тудырып [5]. Бұл өз кезегінде кері байланыс параметрлерін дұрыс баптамаған жағдайда құлыптан шығу ықтималдығын арттырады.

Сцинтилляцияның әсері күшті аймақтарда PLL-дің орнықтылығы оның жолақ еніне тікелей тәуелді [6]. Жолақ кең болса динамикаға жылдам жауап береді, бірақ шу көбірек өтеді. Соңғы жылдары сезімталдықты арттырудың бір бағыты өте тар ілмектерді қолдану [7-8]. бұл әлсіз сигналда фазалық шуды басып, құлыпты ұзағырақ сақтауға мүмкіндік береді, бірақ мұндай шешім динамика мен модель қателігі жағдайында мұқият жобалауды талап етеді. Осылайша, GNSS байланысындағы әлсіз сигнал сапасын жақсарту мәселесі сигнал сапасын жақсарту әлі де өзекті.

Әлсіз GNSS сигналын қадағалауды жақсарту үшін әдебиетте бірнеше негізгі бағыт қалыптасқан. Ілмек параметрлерін бейімдеу дәстүрлі тұрақты баптаулар әлсіз сигнал/динамика сценарийлерінде тиімді бола бермейді [9]. Мұндай әдістердің өнімділігі мен есептеу күрделілігі салыстырмалы түрде талданған.

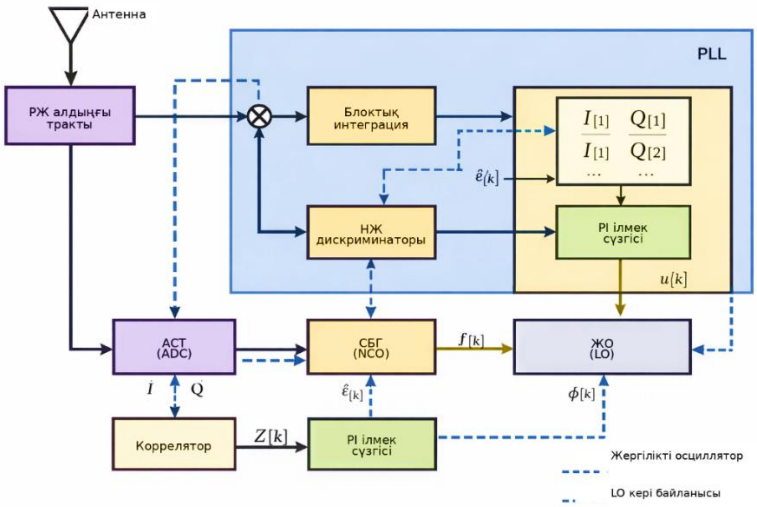
Әлсіз сигналда дискримианторды статистикалық тұрғыдан күшейту (MLE/KF). Фаза/жиілікті бағалауда тәсілдері теориялық тұрғыдан оңтайлы қасиеттер береді, бірақ жиі үлкен есептеу жүктемесін талап етеді[10]. PLL өнімділігін өлшеу фазалық джиттер метрикалары [11]. Мысалы, дискриминатор шығысына негізделген PLL өнімділік метрикасы ұсынылып, ол арқылы нақты жұмыс режимінде қадағалау сапасын бағалау идеясы дамытылды. Векторлық қадағалау ілмектері скалярлық контурларға балама ретінде векторлық қадағалау тәсілдері бірнеше жерсеріктен келетін ақпаратты біріккен күй бағалауында қолданады [12]. Интеграция уақытын таңдау және сезімталдық-жаңарту жиілігі компромисі [13]. Осы trade-off-ты Калман-сүзгілік қадағалау контурлары үшін формальды зерттеп, оптимал когерентті интеграция уақытын таңдауға арналған әдістеме ұсынылған.

Нейрондық желіге негізделген дискриминатор және блоктық когерентті интеграция (BCI-NPLL). Соңғы басым бағыттардың бірі классикалық дискриминаторларының орнына ML/NN қолдану және ұзақ когерентті интеграцияның шектеулерін азайту үшін сигналды қысқа блоктарға бөліп өңдеу. Блоктық когерентті интеграция матрицасын құрып, оны нейрондық дискриминаторға беретін және жабық PLL контурына кіріктіретін әдіс әлсіз сигналда сезімталдықты арттыруға бағытталған тәсіл ретінде жарияланған.

Жалпы алғанда, әдебиетте әлсіз сигналда қадағалау сапасын арттыру үшін: loop параметрлерін бейімдеу, MLE/KF сияқты статистикалық бағалауыштар, өнімділікті джиттер арқылы өлшеу, VTL сияқты біріктірілген контурлар және интеграция уақытын дұрыс таңдау кеңінен қарастырылған. Дегенмен, төмен C/N0 және динамика жағдайында бір мезгілде сезімталдықты да, орнықтылықты да күшейту үшін дискриминация сатысын күшейтетін және жабық керібайланысты сақтайтын шешімдерге сұраныс жоғары болып отыр.

Әлсіз GNSS сигналын қадағалау үшін БКИ-негізді NPLL мен жақсарту әдістері

Бұл бөлімде әлсіз сигнал жағдайында фазаны/жиілікті орнықты қадағалауға арналған ұсынылған БКИ негізінде NPLL оқыту әдісінің құрылымы мен математикалық негізі сипатталады. Әдістің негізгі идеясы үздіксіз ұзақ когерентті интеграция орнына сигналды B қысқа блоктарға бөліп, әр блок бойынша когерентті жинақтау нәтижесінде $Z[k] \in RB \times 2$ матрицасын құрастыру. Қалыптасқан Z[k] құрылымы амплитуда–фаза өзгерістерін сақтай отырып, төмен C/N0 кезінде фазалық қателікті сенімді бағалауға мүмкіндік береді. Фазалық дискриминация классикалық тәсілмен емес, нейрондық желі дискриминаторы арқылы орындалып, алынған қате PI-тәрізді loop-filter арқылы сүзгіден өтіп, сандық басқарылатын генератор параметрлерін жаңартуға қолданылады. Ұсынылған өңдеу тізбегі мен модульдердің өзара байланысы төмендегі суретте 1 көрсетілген.



Сурет 1 – GNSS қабылдағышының құрылымы және тасымалдаушыны қадағалау ілмегі кері байланыс бар басқару жүйесі

Алдымен үздіксіз интеграция орнына қысқа блоктар бойынша алынған коррелятор нәтижелері I_b және Q_b ретінде есептеліп, олардан Z[k] матрицасы қалыптастырылады. бұл матрица блоктар арасындағы амплитуда–фаза өзгерістерін сақтап, жиілік сәйкессіздігінің әсерін жақсырақ сипаттайды. Бұдан кейін классикалық PLL-дегі дәстүрлі дискриминатордың орнына Z[k] матрицасын өңдейтін нейрондық желі енгізіліп, фазалық қателіктің бағасы $\hat{e}_{\varphi}[k]$ алынады. Алынған қате PI-тәрізді loop-filter арқылы сүзгіден өтіп, NCO-ның жиілігі мен фазасын жаңартуға беріледі, яғни құрылым толық жабық кері байланыс ретінде жұмыс істейді. Әдістің тиімділігін тексеру үшін сезімталдық пен дәлдік берілген шу жағдайында параметрді бағалаудың дисперсиясы үшін теориялық ең төмен шек ол CRLB арқылы теориялық бағаланып, ол жабық ілмектегі фазалық джиттермен байланыстырылады. Нәтижесінде БКИ негізінде NPLL-дің төмен CNR және динамикалық жағдайларда қадағалаудың тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік беретіндігі әдістемелік тұрғыдан негізделеді.

Жаһандық навигациялық жерсеріктік жүйе қабылдағышының ішіндегі *негізгі есептегіш блок* корреляторлардың шығысындағы кешенді I/Q сигналды көбіне тасымалдаушыны және кодты PRN салыстырлғаннан кейін қалған қалдық қателіктері бар базалық жолақтағы сигнал ретінде қарастырады. Қабылдағыш кірісіндегі цифрлық кешенді сигналдың үлгісі амплитуда A(t), код кідірісі τ(t), Doppler f_D және тасымалдаушы фаза ϕ(t) түрінде беріледі [14]. коррелятор шығысында сигнал келесі түрде жазылады

$$r(t) = Ae^{j(2\pi\Delta f\, t+\Delta\varphi)} + n(t), \tag{1}$$

Мұндағы A – пайдалы компоненттің *кешенді амплитудасы*. Δf толық жойылмай қалған тасымалдаушы жиіліктің қателігі, Δφ қалдық фазалық қате, n(t) – кешенді ақ Гаусс шуы. Когерентті интеграция (КИ) және оныы төмендегідей сипатаймыз

$$y = Ae^{j\Delta\varphi}\int_0^T e^{j2\pi\Delta f\, t}\, dt + \int_0^T n(t)dt. \tag{2}$$

Ал ақ шуды интегралдағанда ол әлі де кешенді Гаусс болып қалады, тек дисперсиясы T-ға пропорционал өседі (интуитивті түрде: «шу энергиясы» терезе ұлғайған сайын жиналады). Сондықтан идеалда когерентті интеграция SNR-ды шамамен T есеге арттырады (дБ-де $10\log_{10}T$).

Егер Δf≠0 болса, пайдалы сигналдың интеграциядан кейінгі амплитудасы sinc-тәрізді әлсірейді (жиілік қателігі артқан сайын төмендейді). Бұл құбылыс ұзақ T кезінде күшті болады

және дәл осы себептен дәстүрлі КИ ұзартылған сайын әрқашан ұтады деп айтуға болмайды. Динамика жиілік қателігі бар жағдайда кері әсер байқалады [15].

Блоктарға бөлінген когерентті интеграция тәсілінде жалпы үздіксіз интеграция уақыты T өзгермей сақталады, бірақ ол B қысқа блокқа бөлінеді $T_b=T/B$ мұның артықшылығы әр блоктың қысқа болуы себепті Δf_{Tb} азайып, классикалық ұзақ КИ-де байқалатын sinc-тәрізді когерентті әлсіреу төмендейді, сондай-ақ осцилляторлық фазалық дрейфке, динамикаға және навигациялық бит ауысуына бейімделу жеңілдейді (блоктарда жиілік/фазаны бағалап, кейін туралап қосуға болады) әрі есептеулерді параллель орындау ыңғайлы. Әр блок үшін теңдеу төмендегідей жазылады

$$y_b = \int_{(b-1)T_b}^{bT_b} r(t)dt, \qquad b = 1,2,\ldots,B \tag{3}$$

Мұндаңы T_b бір блоктың интеграция ұзақтығы. Жиілік сәйкессіздігі әсері әр блокта азаяды, себебі интеграция терезесі қысқарады. Нәтижесінде y_b мәндерінің пайдалы компоненті толық КИ-ға қарағанда азырақ әлсірейді. Бұл БКИ-дың сезімталдықты жақсартудағы негізгі физикалық-математикалық артықшылығы болып табылады.

БКИ әдісінде жалпы когерентті интеграция уақыты T өзгертілмейді, бірақ ол B бірдей қысқа интервалдарға бөлінеді. Әр интервалда қабылдағышта әдеттегі корреляция орындалып, интеграция нәтижесінде кешенді мән алынады. I синфазалық құраушы және Q квадратуралық құраушы. Осылайша, әрбір b-блок үшін келесі жұп анықталады: I_b-блоктағы синфазалық интеграция нәтижесі, Q_b b-блоктағы квадратуралық интеграция нәтижесі болады. БКИ дың басты ерекшелігі толық T уақыт ішінде алынатын бір ғана (I,Q) жұбының орнына, B қысқа блок бойынша алынған (I_b,Q_b) жұптарының тізбегі қалыптасады. Сондықтан блоктық мәліметтер фазалық қатені сенімді бағалау үшін көбірек пайдалы ақпарат береді. Алынған блоктық мәліметтерді нейрондық желіге беруді жеңілдету үшін олар екі өлшемді массив (матрица) түрінде рәсімделеді. Яғни, матрица келесі түрде беріледі:

$$\mathbf{Z} \in \ddot{Y}^{B\times 2}, \qquad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} I_1 & Q_1 \\ I_2 & Q_2 \\ \text{M} & \text{M} \\ I_B & Q_B \end{bmatrix} \tag{4}$$

Мұндағы Z БКИ бойынша жиналған мәліметтердің ықшам 2D көрінісі. Осы матрица БКИ –кескі ретінде қарастырылады, әрі қарай нейрондық желі дискриминаторына кіріс ретінде беріледі. Нейрондық желі блоктар арасындағы өзгеріс заңдылығын (I/Q тербелісі, амплитуданың өзгеруі, фазаның ауысуы) үйреніп, фазалық қателіктің бағасын шығарады.

Нейрондық желі дискриминаторы фазасын кіріс сигналдың фазасына сәйкестендіру (PLL), дискриминатордың мақсаты әр дискрет уақыт қадамында фазалық қателікті бағалау. Блоктарға бөлінген когерентті интеграцияға негізделген нейрондық PLL тәсілінде бұл функцияны блоктық когерентті интеграция нәтижелерінен құрастырылған Z[k] матрицасын қабылдайтын нейрондық желі орындайды. Мұнда Z[k] k қадамдағы B блок бойынша алынған (I_b,Q_b) жұптарының 2D-көрінісі.

$$\hat{e}_{\varphi}[k] = g_{\theta}\big(\mathbf{Z}[k]\big), \tag{5}$$

мұнда $\hat{e}_{\varphi}[k]$ k – қадамдағы фазалық қателіктің бағасы, gθ(·) параметрлері θ болатын нейрондық желі, Z[k] БКИ матрицасы. БКИ матрицасы келесі түрде беріледі:

$$\mathbf{Z}[k] = \begin{bmatrix} I_1[k] & Q_1[k] \\ I_2[k] & Q_2[k] \\ \text{M} & \text{M} \\ I_B[k] & Q_B[k] \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Практикалық іске асыруда Z[k] матрицасы 2D кескін ретінде қарастырылып, конволюциялық қабаттастырылған нейрондық блок(CNN) арқылы белгілер алынады, ал толық

байланысқан қабаттар (MLP) фазалық қателікті регрессиялайды. Шығыс бір скаляр $\hat{e}_{\varphi}[k]$ немесе тұрақты параметризация үшін cossin/cos жұбы болуы мүмкін:

$$\hat{\mathbf{s}}[k] = \begin{bmatrix} \hat{s}[k] \\ \hat{c}[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\left(\hat{e}_{\varphi}[k]\right) \\ \cos\left(\hat{e}_{\varphi}[k]\right) \end{bmatrix} \tag{7}$$

Нейрондық желі блоктардан алынған өлшемдерден мысалы БКИ матрицасы немесе I/Q векторлары фазалық қателікті дұрыс бағалай алатындай ету, яғни желінің шығысы $\hat{e}_{\varphi}[k]$ ақиқат мәнге барынша жақын болуын генерациялайды. Симуляция кезінде біз сигналды өзіміз құрамыз Δf, Δφ, SNR, динамика сияқты параметрлерді алдын ала беріп, соның нәтижесінде әр уақыт қадамындағы ақиқат фазалық қате $e_{\varphi}[k]$ дәл белгілі болады (нысана мән). Сондықтан оқыту қадағаланатын оқыту (supervised learning) түрінде жүргізіледі. Әр кіріс үлгісіне (БКИ нәтижесі) сәйкес дұрыс жауап (ақиқат $e_{\varphi}[k]$ беріледі, ал желі параметрлері шығыс қателігін азайтатындай жаңартылады.

Нейрондық желі берген $\hat{e}_{\varphi}[k]$ фазалық қатесі классикалық жабық кері байланыс сандық loop-filter арқылы өңделіп, сандық басқарылатын генератор) параметрлерінде жаңартылады[16]. PI-тәрізді екінші жабық кері байланыс үшін:

$$u[k] = K_p \hat{e}_{\varphi}[k] + K_i \sum_{m=0}^{k} \hat{e}_{\varphi}[m] \tag{8}$$

Нейрондық желіден келген $\hat{e}_{\varphi}[k]$ мәні одан әрі сандық loop-filter арқылы тазартылып (шуды басып, динамикаға жауап беретіндей қалыпқа келтіріліп), сандық басқарылатын генератордың басқаруына әсері ретінде беріледі. Екінші ретті PI-тәрізді жабық кері байланыс үшін бұл логика өте түсінікті болады. *P-арна* (пропорционал бөлік) фазалық қатеге тез жауап беріп, қысқа уақытта қателікті азайтады, ал *I-арна* (интеграл бөлік) қалдық жиілік қателігін (Δf) жойып, тұрақты ығысу қалдырмайды сондықтан PLL құлыпта тұруға қабілетті болады. Сандық басқарылатын генератордың жиілігін жаңарту мына түрде болаыд

$$\hat{f}[k+1] = \hat{f}[k] + u[k], \tag{9}$$

Фазаны жаңарту:

$$\hat{\varphi}[k+1] = \hat{\varphi}[k] + 2\pi \hat{f}[k] T_s \tag{10}$$

мұнда Ts – ілмек жаңарту периоды (әдетте жалпы интеграция уақытына T тең немесе соған жуық), Kp және Ki жабық кері байланыс коэффициенттері.

Ұсынылған бағалау әдістемесі жабық ілмектің сезімталдығын сандық анықтауға мүмкіндік береді және үш негізгі қадамнан тұрады.

Фазаны бағалау дәлдігі (дисперсиясы) аддитивті кешенді ақ Гаусс шуы бар жағдайда Крамер-Раоның төменгі шегімен (CRLB) шектеледі, яғни кез келген ығыспайтын бағалаушы үшін

$$\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right) \geq \mathrm{CRLB}_{\varphi} \tag{11}$$

БКИ режимінде ақпарат B блоктан жиналады, сондықтан Фишер ақпараты блоктар бойынша жинақталады:

$$\mathrm{I}_{\varphi}^{(\mathrm{BCI})} = \sum_{b=1}^{B} \mathrm{I}_{\varphi,b}, \qquad \mathrm{CRLB}_{\varphi}^{(\mathrm{BCI})} = \left(\mathrm{I}_{\varphi}^{(\mathrm{BCI})}\right)^{-1} \tag{12}$$

мұнда $I_{\varphi,b}$ – b-блоктан алынатын фаза жөніндегі Фишер ақпараты.

CRLB пен жабық кері байланыс контуры фазалық джиттері арасындағы байланыс жабық кері байланыс дискриминатор қателігінің дисперсиясы жабық кері байланыс динамикасымен сүзгіден өтеді. Жабық контурдағы қалдық фазалық қателіктің дисперсиясы:

$$\sigma_\varphi^2 \approx \alpha\left(K_p, K_i, T_s\right)\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right) \quad (13)$$

$\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right)$ сол бағалаудың *дисперсиясы* (өлшеу/шудың салдарынан пайда болатын белгісіздік). $\alpha(K_p, K_i, T_s)$ жабық кері байланысқа тән эквивалент шу күшейтудың өткізу коэффициенті. Көбіне контурдың шу бойынша беру функциясына байланысты болады. Өлшеу шумы жабық контур арқылы қалай сүзілетінін бір санға жинақтап береді. Kp пропорционал күшейту (PI-регулятордың P бөлігі).Ki интегралдық күшейту (PI-регулятордың I бөлігі). Ts дискреттеу периоды (sample time), яғни алгоритмнің жаңару қадамы.

Бұл формула өлшеу/бағалау шумы $\mathrm{Var}\left(\hat{\varphi}\right)$ жабық контурда нақты *фазалық jitter*-ге қалай айналатынын көрсетеді. Яғни, контур параметрлерін (Kp, Ki, Ts) таңдағанда, шу деңгейі σ_φ қанша болатынын алдын ала бағалауға мүмкіндік береді. Бұлар сәйкесінше, CRLB қолданғанда:

$$\sigma_\varphi^2 \text{‰}\alpha\left(K_p, K_i, T_s\right)\mathrm{CRLB}_\varphi \quad (14)$$

Мұнда α(·) жабық кері байланыс эквивалент коэффициенті (жартылай аналитикалық модельдеу арқылы анықталады). CRLB_φ фазаны бағалаудың теориялық ең төмен мүмкін дисперсия шегі. Бұл формула жүйенің ең жақсы (идеал) жағдайда қол жеткізе алатын *фазалық jitter* деңгейін төменнен шектейді. Яғни теориялық шек береді: қанша жерден алгоритмді жақсартсаңыз да, SNR/шулар берілгенде σ_φ белгілі бір шамадан төмен түсе алмайды (контур арқылы α көбейткішімен өтеді). Сондықтан сезімталдық шегін анықтау үшін жабық кері байланыс «lock» күйін жоғалтпау шарты ретінде фазалық джиттер белгілі бір шектен аспауы тиіс:

$$\sigma_\varphi \le \sigma_{\text{th}} \quad (15)$$

Мұндағы σ_{th} *lock жоғалтпау үшін рұқсат етілетін фазалық jitter шегі* (threshold). Бұл шек көбіне cycle slip ықтималдығы, детектор/демодулятордың жұмыс аймағы, сызықтандыру шарттары сияқты критерийлермен таңдалады. Себебі lock шарты егер RMS фазалық қате σ_φ осы шектен асып кетсе, контур *lock*-ты ұстай алмай, синхроннан шығып кетуі мүмкін. Демек (15) арқылы: сезімталдық шегін (ең төмен SNR) табады немесе K_p, K_i, T_sбаптауы дұрыс па тексереді. Сол негізде БКИ-NPLL әдісінің негізгі түйіндері жүйеленді.

Симулация және нәтижелерді талдау бөлімі

Бұл бөлімде ұсынылған нейрондық дискриминатор және оны қолданатын БКИ негізіндегі NPLL қадағалау кері байланыс жұмыс қабілеті модельдеу арқылы бағаланды. Нәтижелер екі кезеңде талданады: (1) нейрондық дискриминатордың фазаны бағалау дәлдігі, (2) нейрондық оқытуға қосылған БКИ негізіндегі NPLL кері байланыстық терең оқыту трекинг тұрақтылығы және жиілікті/фазаны бағалау қателігі анықталады.

I_b және Q_b мәндерінің масштабы әртүрлі болған жағдайда, нейрондық желіні оқытпас бұрын Z[k] матрицасын алдын ала нормалау ұсынылады. Коррелятордан алынған I_b және Q_b өлшемдерінің динамикалық диапазоны әртүрлі болуы мүмкін, бұл нейрондық желінің үйрену тұрақтылығына кері әсер етеді. Сондықтан Z[k] матрицасына нормалау енгізу ұсынылады. Амплитудалық нормалаудың:

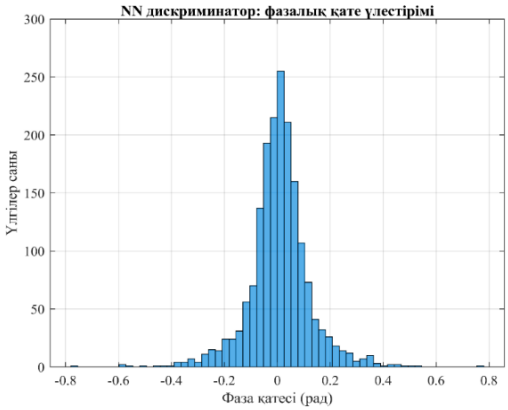
$$I_b^{(n)}[k] = \frac{I_b[k]}{\sqrt{I_b^2[k] + Q_b^2[k]} + \varepsilon}, \qquad Q_b^{(n)}[k] = \frac{Q_b[k]}{\sqrt{I_b^2[k] + Q_b^2[k]} + \varepsilon} \quad (16)$$

Мұнда ε нөлге бөлінуді болдырмайтын кіші тұрақты. Балама ретінде стандарттау қолданылуы мүмкін:

$$\mathbf{Z}^{(n)}[k] = \frac{\mathbf{Z}[k] - \mu}{\sigma} \tag{17}$$

Мұнда μ және σ оқыту жиынтығы бойынша есептелген орта мән және стандарттық ауытқу. Нормалау нейрондық дискриминатордың конвергенциясын жақсартып, төмен C/N0 аймағында бағалау дәлдігін тұрақтандыруға мүмкіндік береді.

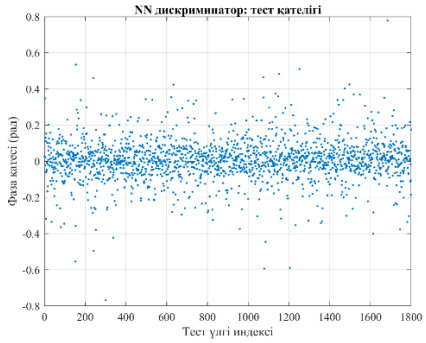
NN дискриминатордың фазаны бағалау дәлдігін тексеру үшін оның шығаратын фазалық қате сигналы e_φ[k]] (рад) талданды. Қателіктің таралуын көру мақсатында еφ[k] мәндерінің үлестірімі гистограмма 2-суретте көрсетілді.



Сурет 2 – NN дискриминатор: фазалық қате үлестірімі. $e\varphi[k]$ фазалық қатесінің (рад) гистограммасы, мұндағы Yүлгі саны

Гистограмма фазалық қатенің негізгі бөлігі 0 рад маңында шоғырланғанын көрсетеді, яғни NN дискриминатордың бағалауы орташа алғанда жүйелі ығысуды (bias) аз береді. Үлестірімнің салыстырмалы симметриялығы қателіктің «оң/теріс» бағытта теңгерімді екенін, ал шеткі құйрықтар сирек кездесетін үлкен қателердің бар екенін білдіреді. Бұл қателер кейін loop-filter арқылы өңделіп, сандық басқарылатын осциллятор параметрлерін жаңартуға түсетіндіктен, үлестірімнің ені (дисперсиясы) ілмектің фазалық джиттеріне және қадағалау тұрақтылығына тікелей әсер етеді.

Оқытылған нейрондық дискриминатордың жалпылау қабілетін бағалау үшін бөлек тест жиынында фазалық қате еφ[k] есептелді. Тест үлгілеріндегі қателіктің уақыт/индекс бойынша өзгерісі нүктелік диаграмма ретінде 3-суретте берілді.



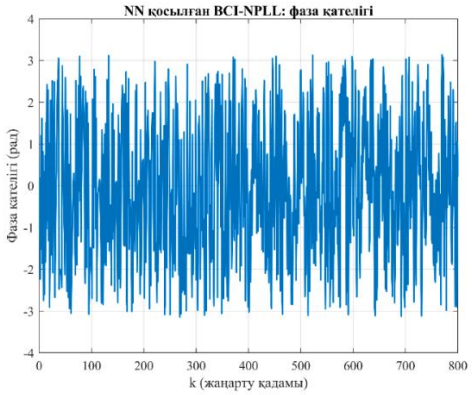
Сурет 3 – Нейрондық дискриминатор фазалық қатенің $e\varphi[k]$ (рад) мәндерінің үлгі индексіне тәуелді таралуы

Нүктелердің басым бөлігі 0 рад маңында орналасқан, бұл дискриминатордың орташа қателігінің аз екенін (bias-тың төмендігін) көрсетеді. Қателіктің үлгі индексі бойынша айқын тренд бермеуі модельдің тест деректерінде тұрақты жұмыс істейтінін білдіреді. Сирек кездесетін үлкен ауытқулар шуылдың/күрделі үлгілердің әсерінен пайда болуы мүмкін және олар ілмектегі loop-filter параметрлерін таңдауда ескеріледі.

NN-дискриминатор BCI-NPLL құрылымында фазалық дискриминатор ретінде қолданылады: ол блоктық когерентті интеграциядан алынған Z[k] матрицасы бойынша фазалық қатені e_φ[k] бағалайды. Бұл қате сигналы сандық PI кері байланыс қате сигналын фильтрі арқылы өңделіп, сандық басқарылатын осциллятор/генератор параметрлерін жаңартады. Нәтижесінде контурдың ішкі реплика сигналы кіріс сигналмен синхрондалып, $\hat{\varphi}[k]$ (фаза) және $\hat{f}[k]$ (жиілік) бағалары біртіндеп түзетіледі. Қадағалау сапасын сандық бағалау үшін фазалық қателіктің орташа квадраттық қателігі (RMSE) қолданылды.

$$RMSE_{tr} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(\mathrm{wrap}\left(\varphi_{true}[k]-\hat{\varphi}[k]\right)\right)^2} \qquad (18)$$

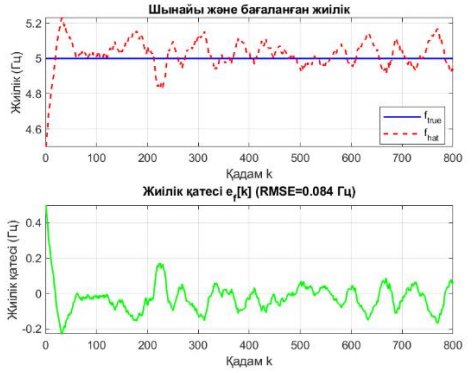
Мұнда N – жаңарту қадамдарының саны, φ_{true}[k] шынайы фаза, $\hat{\varphi}[k]$ контур бағалаған фаза, ал wrap(·) фаза айырмасын (−π,π] аралығына келтіреді себебі фазаның оралуын жою үшін. Нейрондық желі дискриминатордан алынған фазалық қате сигналы PI- кері байланыс сүзгісі арқылы өңделіп, сандық басқарылатын осциллятор параметрлері жаңартылды. Осы бөлімде нейрондық желі қосылған БКИ негізінде NPLL қадағалау контурының уақыт бойынша фазалық қателік динамикасы көрсетіледі.



Сурет 4 – Нейрондық желі қосылған БКИ негізіндегі NPLL қадағалау контурындағы фазалық қателік $\Delta\varphi[k]$ (рад) мәнінің k жаңарту қадамдары бойынша өзгеруі

Графиктен фазалық қателік Δφ[k] уақыт бойынша нөл маңында тербелетіні байқалады, яғни контур қадағалау режимін сақтайды. Қадағалау сапасы сандық түрде 18 формуллада келтірілген RMSEtr көрсеткіші арқылы бағаланды (төмен RMSEtr дәл қадағалау белгісі).

Фазалық қателікпен қатар, қадағалау контурының жиілік бойынша қаншалықты дұрыс түзетілетінін бағалау үшін жиілік қателігінің Δf[k] уақыт бойынша өзгерісі қарастырылады. Төмендегі график нейрондық желі қосылған БКИ негізінде NPLL жүйесіндегі жиілік қателігінің k жаңарту қадамдары бойынша динамикасын көрсетеді.



Сурет 5 – Нейрондық желі қосылған БКИ негізінде NPLL қадағалау контурындағы жиілік қателігі Δf[k] (Гц) мәнінің k жаңарту қадамдары бойынша өзгеруі

Суретте дискриминаторы қосылған БКИ негізінде NPLL ілмегінің жиілікті бағалау нәтижесін көрсетеді. Жоғарғы графикте шынайы жиілік f_{true} (көк) және ілмекпен бағаланған жиілік f_{hatf} (қызыл штрих) салыстырылған. Бастапқы өтпелі процестен кейін f_{hat} траекториясы f_{true} мәнін сенімді қадағалап, ұзақ уақыт аралығында тұрақты түрде ұстап тұрады, яғни ілмек тұрақты режимге (lock) кіреді.

$e_f[k]=f_{true}[k]-f_{hat}[k]$ берілген. Қате нөл маңында шоғырланып, шектеулі диапазонда тербеледі және айқын дрейф байқалмайды. Қателіктің орташа квадраттық қателігі RMSE=0.084Гц, бұл ұсынылған NN-BCI дискриминаторы мен NPLL кері байланыс тізбегі қалдық жиілік қателігін тиімді басатынын және бағалаудың дәлдігі шуылмен шектелетін деңгейге жеткенін көрсетеді. Қажет болған жағдайда тербелісті одан әрі азайту үшін ілмек жолағын (немесе Kp,Ki кішірейту және/немесе интеграция уақытын ұлғайту ұсынылады.

Қорытынды

Бұл жұмыста GNSS байланысындағы әлсіз сигнал жағдайында тасымалдаушыны (фаза/жиілік) қадағалау сапасын арттыру үшін блоктарға бөлінген когерентті интеграцияға негізделген нейрондық PLL (ББИ–NPLL) тәсілі ұсынылды. Ұзақ когерентті интеграцияда жиілік сәйкессіздігі мен динамика әсерінен пайдалы компоненттің әлсіреуі байқалатындықтан, сигналды қысқа блоктарға бөлу арқылы пайдалы ақпараттың сақталуы жақсарды және классикалық дискриминатордың орнына нейрондық желі дискриминаторы енгізіліп, фазалық қателікті бағалау жақсыртылды.

Модельдеу нәтижелері нейрондық дискриминатор қателігінің нөл маңында шоғырланатынын және жүйелі ығысуының төмен екенін көрсетті, ал нейрондық желі қосылған ББИ-NPLL контуры фазаны қадағалау режимін сақтап, фазалық қателіктің нөл маңында тербелуі арқылы lock күйін жоғалтпай жұмыс істейтінін дәлелдеді. Жиілік бойынша бастапқы өтпелі процестен кейін бағаланған жиілік шынайы жиілікті сенімді қадағалап, қалдық жиілік қатесі төмен деңгейде қалды (жиілік қателігінің орташа квадраттық қателігі шамамен 0.084 Гц), бұл ұсынылған құрылымның әлсіз сигналда да жиілік/фаза қателіктерін тиімді басатынын көрсетеді.

Ұсынылған тәсілді қалалық каньон, көлеңкелі аймақтар және ғимарат ішінде сияқты сигнал әлсірейтін ортада, сондай-ақ UAV/робот/автономды көлік тәрізді динамикасы жоғары платформаларда трекинг орнықтылығын арттыру үшін және бағдарламалық (SDR) GNSS қабылдағыштарында әлсіз сигналды қадағалау модулін күшейту бағытында қолдануға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Jing S. Weak and dynamic GNSS signal tracking strategies for flight missions in the space service volume / S. Jing et al // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 9. – Art. 1412. https://doi.org/10.3390/s16091412.
2. Scientific and methodological bases of GPS monitoring of intensive movements of the Earth's crust in the earthquake-prone regions of Kazakhstan / Zh.Sh. Zhantayev et al // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Physics and Mathematics. – 2020. – Vol. 3, № 331. – P. 177-182. https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.51.
3. A two-stage Kalman filter-based carrier tracking loop for weak GNSS signals / Y. Cheng et al // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 6. – Art. 1369. https://doi.org/10.3390/s19061369.
4. Guo K. Effects of GNSS receiver tuning on the PLL tracking jitter estimation in the presence of ionospheric scintillation / K. Guo, M. Aquino, S. Vadakke Veettil // Space Weather. – 2020. – Vol. 18, № 7. – Article e2019SW002362. https://doi.org/10.1029/2019SW002362.
5. Examining the tolerance of GNSS receiver phase tracking loop under the effects of severe ionospheric scintillation conditions based on its bandwidth / I.P. Portella et al // Radio Science. – 2021. – Vol. 56, № 6. – P. 1-11. https://doi.org/10.1029/2020RS007160.
6. Bochkati M. Use of ultra-low-bandwidth tracking loops for improved GNSS receiver phase tracking under thermal stress / M. Bochkati, J. Dampf, T. Pany // NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation. – 2026. – Vol. 73. – Article navi.744. https://doi.org/10.33012/navi.744.

7. Evaluation of adaptive loop-bandwidth tracking techniques in GNSS receivers / I. Cortés et al // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 2. – Art. 502. https://doi.org/10.3390/s21020502.
8. A carrier estimation method based on MLE and KF for weak GNSS signals / H. Zhang et al // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 7. – Art. 1468. https://doi.org/10.3390/s17071468.
9. Stevanovic S. A GPS phase-locked loop performance metric based on the phase discriminator output / S. Stevanovic, B. Pervan // Sensors. – 2018. – Vol. 18, № 1. – Art. 296. https://doi.org/10.3390/s18010296.
10. O'Driscoll C. Choosing the coherent integration time for Kalman filter-based carrier-phase tracking of GNSS signals / C. O'Driscoll, M.G. Petovello, G. Lachapelle // GPS Solutions. – 2011. – Vol. 15. – P. 345-356. https://doi.org/10.1007/s10291-010-0194-4.
11. Improved GNSS vector tracking loop to enhance the navigation performance of USV / W. Liu et al // Ocean Engineering. – 2022. – Vol. 258. – Art. 111865. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111865.
12. Weak GPS signal tracking using block coherent integration based on NN discriminator / Z. Gong et al // Research Square. – 2025. – Preprint. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6350123/v1.
13. Borio D. A non-coherent architecture for GNSS digital tracking loops / D. Borio, G. Lachapelle // Annals of Telecommunications. – 2009. – Vol. 64, № 9-10. – P. 601-614. https://doi.org/10.1007/s12243-009-0114-1.
14. Zhao W. Adaptive multiple-model Kalman filter for GNSS carrier phase and frequency estimation through wideband interference / W. Zhao, S. Khanafseh, B. Pervan // NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation. – 2024. – Vol. 71, № 2. – Article navi.646. https://doi.org/10.33012/navi.646.
15. Guillard A. Using convolutional neural networks to detect GNSS multipath / A. Guillard, P. Thevenon, C. Milner // Frontiers in Robotics and AI. – 2023. – Vol. 10. – Art. 1106439. – https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1106439.

Н.П. Сапарходжаев[1], А. Хабай[2]*, М.Ж. Иген[2], Е.А. Тулешов[2,3], Ж.Н. Исабеков[2]
[1]Рудненский индустриальный университет,
г. Рудный, Костанайская область, ул. 50 лет Октября, 38
[2]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
[3]Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко, 28
*e-mail: a.khabay@satbayev.university

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА GNSS-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В канале GNSS при слабом сигнале точность слежения за фазой и частотой, несущей в приёмнике резко, ухудшается, что снижает устойчивость и качество навигационного решения. Целью данной работы является улучшение качества слабого GNSS-сигнала, то есть повышение чувствительности системы автоматической регулировки, несущей в условиях низкого качества сигнала и динамических воздействий, а также уменьшение фазовых/частотных ошибок. Объект исследования – базовый I/Q-сигнал на выходе коррелятора GNSS-приёмника и работа контура слежения за несущей. В предложенном методе вместо традиционной длительной когерентной интеграции используется блочно-когерентная интеграция (БКИ). Общее время интеграции T сохраняется, сигнал делится на BBB коротких блоков, и по результатам I_b,Q_b формируется матрица Z[k]. Эта матрица сохраняет изменения амплитуды и фазы и точнее описывает влияние частотного рассогласования и динамики. Далее нейросетевой дискриминатор (CNN+MLP), обрабатывающий данные, оценивает фазовую ошибку, которая затем фильтруется PI-подобным loop-filter и в замкнутой обратной связи обновляет параметры численно управляемого генератора (NCO). Научная новизна заключается в представлении информации БКИ в виде 2D-матрицы, замене классического дискриминатора контура фазовой синхронизации нейросетевым дискриминатором в замкнутой структуре BCI–NPLL, а также в численном обосновании чувствительности через связь CRLB и фазового джиттера. Результаты моделирования показали, что предложенный подход сохраняет устойчивость слежения в области слабых сигналов, фазовая ошибка концентрируется около нуля, а точность оценки частоты является высокой (RMSE≈0.084 Гц). В результате метод позволяет улучшить качество слабого GNSS-сигнала и повысить устойчивость трекинга приёмника.

Ключевые слова: *GNSS, слабый сигнал, блочно-когерентная интеграция (БКИ), нейронная PLL (NPLL), CNN-дискриминатор, PI loop-filter, NCO, CRLB*.

N.P. Saparhodzhaev[1], A. Khabay[2]*, M.Zh. Igen[2], E.A. Tuleshov[2,3], Zh.N.Issabekov[2]
[1]Rudny Industrial University,
Rudny, Kostanay Region, 50 Let Oktyabrya Street, 38
[2]Satbayev University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22
[3]Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after Academician U.A. Dzholdasbekov,
Republic of Kazakhstan, Almaty, Shevchenko Street, 28
*e-mail: a.khabay@satbayev.university

IMPROVING ARTIFICIAL INTELLIGENCE–BASED METHODS FOR ENHANCING GNSS SIGNAL QUALITY

In a Global Navigation Satellite System (GNSS) communication channel under weak-signal conditions, accurate tracking of the receiver carrier phase and frequency degrades sharply, reducing the stability and overall quality of the navigation solution. The purpose of this work is to improve weak GNSS signal quality, i.e., to increase the sensitivity of the carrier automatic control (tracking) system under low-quality signals and dynamic impacts and to reduce phase/frequency errors. The research object is the baseband I/Q signal at the output of the GNSS receiver correlator and the operation of the carrier tracking loop. The proposed method replaces conventional long coherent integration with block coherent integration (BCI). The total integration time T is preserved, the signal is divided into BBB short blocks, and a matrix Z[k] is formed from the block results I_b, Q_b. This matrix preserves amplitude-phase variations and more accurately characterizes the effects of frequency mismatch and dynamics. Next, a neural-network discriminator (CNN+MLP) that processes Z[k] estimates the phase error; the error is then filtered by a PI-type loop filter and, in closed feedback, updates the parameters of the numerically controlled oscillator (NCO). The novelty of the approach lies in representing BCI information as a 2D matrix, replacing the classical phase-locked loop discriminator with a neural discriminator in a closed BCI-NPLL architecture, and providing a quantitative sensitivity justification via the CRLB-phase jitter relationship. Simulation results show that the proposed approach maintains tracking stability in the weak-signal region, the phase error is concentrated around zero, and the frequency estimation accuracy is high (RMSE≈0.084 Hz). Consequently, the method improves weak GNSS signal quality and increases receiver tracking robustness.

Key words: *GNSS, weak signal, block coherent integration (BCI), neural PLL (NPLL), CNN discriminator, PI loop filter, NCO, CRLB.*

Авторлар туралы мәліметтер

Нурбек Пажарбекович Сапарходжаев – PhD, қауымдастырылған профессор, Басқарма Төрағасы-Ректор, Рудный индустриалық университеті, Рудный, Қазақстан; e-mail: nursp81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9204-5374.

Анар Хабай* – PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, «Электротехника және ғарыштық техника телекоммуникациясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Мағжан Жақсылықұлы Иген – магистрант Satbayev University, «Электротехника және ғарыштық техника телекоммуникациясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан; e-mail: 030303500411-m@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7156-5182.

Еркебулан Амандыкович Тулешов – т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы, Satbayev University, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, қауымдастырылған профессор, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы, Satbayev University, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Сведения об авторах

Нурбек Пажарбекович Сапарходжаев – PhD, ассоциированный профессор, председатель правления-Ректор, Рудненский индустриальный университет, Рудный, Казахстан; e-mail: nursp81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9204-5374.

Анар Хабай* – PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, кафедра «Электротехники и космической техники телекоммуникаций», Алматы, Казахстан; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Магжан Жаксылыкович Иген – магистрант Satbayev University, кафедра «Электротехника и космическая техника Телекоммуникации», Алматы, Казахстан; e-mail: 030303500411-m@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7156-5182.

Еркебулан Амандыкович Тулешов – к. т. н., ассоциированный профессор, кафедра робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, Институт автоматики и информационных технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Жанибек Назарбекович Исабеков – PhD, ассоциированный профессор, кафедра робототехники и технических средств автоматики, Satbayev University, институт автоматики и информационных технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

References

Nurbek Pazharbekovich Saparkhodzhayev – PhD, associate professor, Chairman of the management board-Rector, Rudny industrial University, Rudny, Kazakhstan; e-mail: nursp81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9204-5374.

Anar Khabay* – PhD, associate professor, Satbayev University, Department of Electrical Engineering and Telecommunications of space technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.khabay@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0409-1531.

Magzhan Zhaksylykovich Igen – master's student Satbayev University, Department of Electrical Engineering and Telecommunications of space technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: 030303500411-m@stud.satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7156-5182.

Erkebulan Amandykovich Tuleshov – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of robotics and technical means of automation, Satbayev University, Institute of automation and information technologies, Almaty, Kazakhstan; e-mail: y.tuleshov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9146-7137.

Zhanibek Nazarbekovich Issabekov – PhD, Associate Professor, Department of robotics and technical means of automation, Satbayev University, Institute of automation and information technologies, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z.issabekov@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2900-8025.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Жариялауға қабылданды 17.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-5

IRSTI: 28.23.13

M.A. Sambetbayeva[1,3], V.B. Barakhnin[2], A.N. Sultangaziyeva[1,4,*], N.K. Mukazhanov[1,5], R.A. Begim[3]

[1]«Q» University, 050026, Republic of Kazakhstan, Almaty, str. Baizakov 125/185,
[2]Novosibirsk State Technical University,
Russia, Novosibirsk 630087, str. Nemirovicha-Danchenko 136.
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str. 2.
[4]Astana International University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Qabanbay Batyr Avenue, 8
[5]Narxoz University, Kazakhstan, Almaty 050035, str. Zhandosov 55.
*e-mail: anar_sultangazieva@aiu.edu.kz

ONTOLOGY-AWARE FOR PHENOTYPE TERM NORMALIZATION AND GROUP ASSIGNMENT

Abstract: *This study addresses the problem of automating the processing of terminological data using ontology-oriented methods of natural language processing. Modern information systems increasingly operate with heterogeneous and poorly structured terms presented in the form of lists or textual descriptions, which complicates their normalization, comparison, and subsequent automatic classification. This problem is particularly relevant in biomedical informatics, where phenotypic descriptions of hereditary diseases require standardized representation for integration into intelligent information systems.*

©M.A. Sambetbayeva, V.B. Barakhnin, A.N. Sultangaziyeva, N.K. Mukazhanov, R.A. Begim, 2026