

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ У ТЕЛЕМЕДИЦИНІ

© Безрук В. М., Ніколаєв І. П., Чеботарьова Д. В., 2014

**Формулюється задача автоматизації аналізу структури нічного сну пацієнта за електроенцефалограмами. Пропонується алгоритм автоматизованого розпізнавання стадій сну за відліками електроенцефалограм, що передаються у цифровому вигляді відповідними каналами зв'язку. Розглядаються деякі особливості вибору пропускових здатностей та відповідних телекомунікаційних технологій для телемедичних мереж.**

**Ключові слова:** телемедицина, розпізнавання стадій сну, електроенцефалограма, пропусковна здатність.

**The problem of automation and objectification of determining the structure of night sleep of the patient is formulated. An algorithm for automated recognition of sleep stages by EEG readings, transmitted in a digital form by appropriate communication channels, is proposed. As well as that, we consider some details of choice of bandwidth and relevant communication technologies for the telemedicine networks.**

**Key words:** telemedicine, recognition of sleep stages, EEG, bandwidth.

### Вступ

Телемедицина – це напрям медицини, що використовує інформаційні та телекомунікаційні технології для надання консультацій та медичної допомоги пацієнтові незалежно від його місцезнаходження. Предмет телемедицини – це передавання за допомогою телекомунікацій і комп'ютеризована обробка медичної інформації. Існують різні види медичних процедур: телемедичне консультування, біотелеметрія (телемоніторинг), домашня телемедицина, телескринінг, телеприсутність, телеасистування, дистанційне навчання [1]. Процес обробки медичної інформації характеризується видом, способом її передавання та обробки.

У цій роботі наведено особливості розв'язання однієї із задач обробки медичної інформації – розпізнавання сигналів, що виконується у автоматизованій системі підтримки прийняття рішень для дистанційної постановки діагнозу пацієнта за електрофізіологічними сигналами. Наводиться приклад розв'язання задачі розпізнавання стадій сну пацієнта за електроенцефалограмами, що передаються у цифровому вигляді каналами зв'язку. Розглядаються деякі особливості вибору телекомунікаційних технологій, які можна використати для передавання інформації в телемедицині.

### 1. Постановка задачі розпізнавання сигналів

Припустимо, що розпізнаються об'єкти, представлені скінченновимірними випадковими векторами відліків сигналів  $\vec{x}$ , за реалізаціями яких приймають рішення про їх приналежність.

Задамо  $(M + 1)$ -у гіпотези, які можна зробити щодо спостережуваних сигналів:  $H^i$ ,  $i = \overline{1, M}$  –

для заданих у ймовірнісному сенсі сигналів,  $H^0$  – для сигналів з невідомими ймовірнісними характеристиками, які об'єднані в  $(M + 1)$ -й клас. Щільності ймовірності заданих сигналів

$W(\vec{x} | \vec{\alpha}^i)$ ,  $i = \overline{1, M}$  задано з точністю до випадкових векторних параметрів  $\vec{\alpha}^i$ ,  $i = \overline{1, M}$ , а для  $(M + 1)$ -го класу щільність ймовірності невідома. Задані також апіорні ймовірності гіпотез

$P(H^i) = P_i$ , причому  $\sum_{i=0}^M P_i = 1$ . Вважається, що задані навчальні вибірки  $M$  заданих сигналів

$\{\bar{x}_r^i, r = \overline{1, n_i}; i = \overline{1, M}\}$ , а навчальна вибірка для  $(M + 1)$ -го невідомих сигналів ( $i = 0$ ) відсутня або є непередставницькою. Зі змістового погляду розглянута задача розпізнавання полягає в прийнятті рішення про дію одного з  $M$  заданих сигналів і зарахування невідомих сигналів у  $(M + 1)$ -й клас. У зв'язку з цим така задача розпізнавання може бути названа селекцією і розпізнаванням заданих випадкових сигналів.

## 2. Вирішальне правило селекції та розпізнавання заданих сигналів

Для сформульованої нетрадиційної задачі селекції та розпізнавання заданих сигналів за наявності невідомих сигналів отримане таке вирішальне правило [2]:

якщо виконуються нерівності

$$H^0 : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} < \lambda, \quad (1a)$$

то приймається гіпотеза  $H^0$  про дію  $(M + 1)$ -го класу невідомих сигналів;

у разі виконання системи нерівностей

$$H^i : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} \geq \lambda, \quad (1b)$$

$$P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l) \geq P_i W(\bar{x} / \bar{\alpha}^i), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq i \quad (1b)$$

приймається гіпотеза  $H^i$  про дію заданого  $i$ -го сигналу.

Тут порогове значення  $\lambda$  визначається за умови забезпечення заданої ймовірності правильного розпізнавання заданих сигналів.

Зауважимо, що для виведення цього вирішального правила не використовувалась інформація про щільність розподілу  $(M + 1)$ -го сигналу і не була потрібна його навчальна вибірка. Постановка та розв'язання розглянутої задачі – це формалізація вимоги змістового характеру про необхідність розпізнати  $M$  заданих сигналів і зарахувати в  $(M + 1)$ -й клас всі інші невідомі сигнали, інформації про які недостатньо для їх розпізнавання. Конкретний вид вирішального правила (1) залежить від ймовірнісної моделі, яка використовується для опису розпізнаваних сигналів.

Зокрема, у разі вибору для опису сигналів ймовірнісної моделі у вигляді гауссівських авторегресійних процесів вирішальне правило розпізнавання (1) має такий вигляд [2]:

якщо виконуються система нерівностей

$$H^l : K_l(\bar{x}) < \Lambda_l, \quad l = \overline{1, M} \quad (2a)$$

$$K_l(\bar{x}) - K_i(\bar{x}) + \ln \frac{(2\pi\sigma_i)^{p_i - L}}{(2\pi\sigma_k)^{p_k - L}} \geq \ln \frac{P_l}{P_i}, \quad (2b)$$

то приймається гіпотеза про дію  $i$ -го заданого сигналу;

якщо виконуються нерівності

$$H^{M+1} : K_l(\bar{x}) > \Lambda_l, \quad l = \overline{1, M}, \quad (2b)$$

то приймається гіпотеза про дію невідомого сигналу.

Тут  $K_l(\bar{x}) = \frac{1}{2\sigma_l^2} \sum_{k=p+1}^L \left[ x_k - \mu_l - \sum_{j=1}^{p_l} a_j^l (x_{k-j} - \mu_l) \right]^2$  – співвідношення, що визначає нормовану

помилку передбачення в авторегресійній моделі;  $p_l, a_j^l$  – порядок і параметри авторегресійної моделі

для  $l$ -го сигналу;  $\Lambda_l = \ln \frac{(2\pi)^{\frac{L}{2}} \sigma_l^{L-p_l} \lambda_l}{P_l}$  – деякі порогові значення, що визначаються за умови

забезпечення заданих ймовірностей правильного розпізнавання  $M$  заданих сигналів.

### 3. Автоматизоване розпізнавання стадій сну пацієнта за електроенцефалограмами

Однією із задач телемедицини є ефективніше використання висококваліфікованих лікарів у дистанційній діагностиці захворювань пацієнтів. Деякі рутинні задачі обробки медичної інформації з достатньою точністю і надійністю можуть розв'язувати автоматизовані системи підтримки прийняття рішень, що базуються на відповідному математичному апараті. При цьому фахівець може заощадити час та увагу для більш складних і важливих рішень, відповідних його кваліфікації. До того ж, коли для постановки діагнозу застосовуються формалізовані методики прийняття рішення, використання відповідних строгих математичних методів може дати об'єктивніші висновки щодо постановки діагнозу. Прикладом оптимізації праці лікарів у телемедицині може слугувати використання автоматизованих систем віддаленої діагностики, що базуються на методах розпізнавання електрофізіологічних сигналів, що передані по каналах зв'язку. Розглянемо особливості розв'язання задачі автоматизованого розпізнавання стадій сну пацієнта за електроенцефалограмами (ЕЕГ) [3]. Вивчення структури сну і його порушень займає важливе місце в сучасній експериментальній та клінічній медицині. Аналіз структури нічного сну відіграє важливу роль у діагностиці захворювань головного мозку. В разі функціональних захворювань нервової системи і психозів скарги на порушення сну нерідко бувають основними, іноді і єдиними. Дослідження структури нічного сну виявляється корисним і для аналізу функції і механізмів сну. Зокрема, актуальними стають дослідження структури сну в кардіологічній клініці у хворих на ішемічну хворобу серця, оскільки небезпечні кризи серцево-судинної системи – порушення серцевого ритму, інфаркт міокарда – часто виникають під час нічного сну.



Рис. 1. Структура системи автоматизованого розпізнавання стадій сну за ЕЕГ

У разі зміни функціонального стану мозку змінюється і характер його електричної активності. Встановлено, що ЕЕГ може слугувати індикатором рівня неспання мозку і адекватно відобразити глибину сну. Успіхи у вивченні організації сну тісно пов'язані із застосуванням електроенцефалографічних методів дослідження. Однак розпізнавання стадій сну за ЕЕГ пов'язано зі значними витратами часу, оскільки запис ЕЕГ нічного сну займає сотні метрів паперової стрічки. Крім того, у візуальному аналізі використовуються описові критерії ідентифікації стадій сну, що породжує розбіжності серед фахівців у оцінці моментів переходу між стадіями. Тому виникає необхідність об'єктивізації та автоматизації процесу дослідження структури сну пацієнта. Для цього можуть бути використані оцифровані та передані каналами зв'язку відліки ЕЕГ, а також математичні методи розпізнавання стадій сну за ЕЕГ, що реалізовані на ЕОМ на приймальній стороні. Автоматизоване визначення стадій сну за ЕЕГ з використанням математичних методів розпізнавання пов'язане з труднощами, викликаними близькістю спектрального складу ЕЕГ для окремих фаз і стадій сну, істотною відмінністю ЕЕГ для різних осіб, виникненням різноманітних артефактів. У роботі [3] запропоновано розв'язання задачі розпізнавання стадій сну пацієнта для випадку описування послідовності відліків ЕЕГ адекватною математичною моделлю у вигляді процесів авторегресії. При цьому алгоритм розпізнавання стадій сну за ЕЕГ визначається співвідношеннями (2) і може бути реалізований на комп'ютері. Це уможливило автоматизоване розпізнавання стадій сну за ЕЕГ, яке можна використати у системі підтримки прийняття рішень під час постановки лікарем діагнозу захворювань пацієнта. При цьому система розпізнавання працює у двох режимах: навчання та розпізнавання. На етапі навчання за класифікованими

реалізаціями ЕЕГ, накопиченими для заданих стадій сну, оцінюються деякі параметри алгоритму розпізнавання. На етапі розпізнавання проводиться автоматичне прийняття рішення про відповідність отриманої реалізації ЕЕГ одній із заданих стадій сну. За результатами розпізнавання лікар на основі свого досвіду робить відповідні висновки про захворювання пацієнта. У разі появи артефактів приймається рішення про приналежність ЕЕГ до невідомого класу.

Цю систему розпізнавання також можна реалізувати у багатоканальному варіанті, коли реалізації ЕЕГ надходять з декількох каналів енцефалографа. Це дає набагато більше інформації для розпізнавання, але в цьому випадку необхідно використати векторну авторегресійну модель і складніший алгоритм розпізнавання ЕЕГ. Для дослідження задачі автоматизованого розпізнавання стадій сну за ЕЕГ використано вирішувальне правило (2). Дослідження проведено на вибірках реалізацій ЕЕГ для шести стадій сну. За класифікованими навчальними вибірками ЕЕГ знайдено параметри вирішувального правила (2). Контрольні вибірки використано у дослідженнях практичних особливостей розв'язання задачі автоматизованого розпізнавання стадій сну за ЕЕГ. В результаті розпізнавання ЕЕГ для різних стадій сну отримано діаграму зміни стадій сну, що наведена на рис. 2. Також досліджувалась залежність оцінки середньої ймовірності помилкового розпізнавання стадій сну від інтервалу спостереження ЕЕГ  $T$ , за яким приймалось рішення про поточну стадію сну (рис. 3). Отримана оцінка мінімального значення середньої ймовірності помилкового розпізнавання стадій сну  $P_{ou.cp.} = 0.15$ .

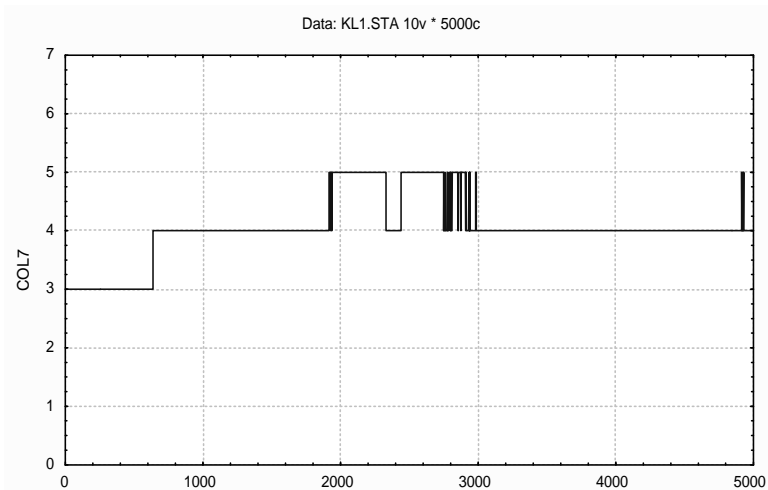


Рис. 2

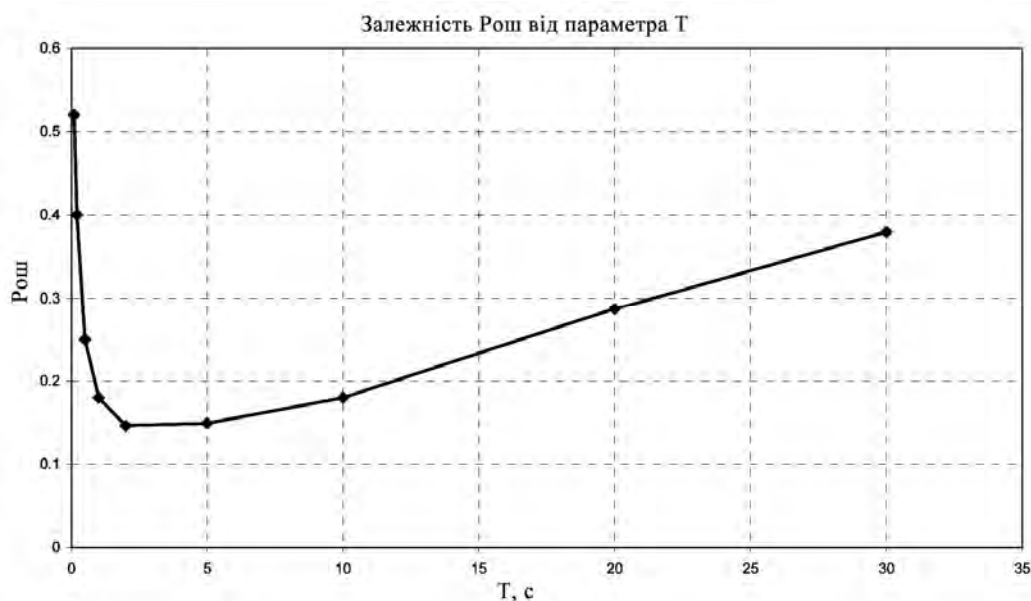


Рис. 3

#### 4. Вибір телекомунікаційних технологій в телемедицині

Оскільки телемедицина є наданням медичних послуг за допомогою телекомунікаційних технологій, то можливості телемедицини обмежені шириною смуги пропускання середовища передавання, що використовується. Важливість правильного вибору телекомунікаційних технологій для телемедицини важко переоцінити, бо від цього залежать такі характеристики сервісу, як доступність, якість тощо. Для телемедицини найважливішу роль відіграють такі показники: якість звуку; роздільна здатність зображення; повнота відображення руху; швидкість передачі інформації. Під час вибору оптимальної технології ці величини зазвичай виявляються антагоністичними, тому необхідний пошук компромісу між мінімальним часом доставки інформації, вірогідністю та вартістю використання технології. Наприклад, передача голосової інформації із задовільною якістю ставить значно нижчі вимоги до смуги пропускання, ніж відеозв'язок задовільної якості, а full-motion video у HD, що можуть використовуватись, наприклад, для оцінки ходи, є вимогливішими до смуги пропускання, ніж звичайні відеоконференції, що дають змогу відтворювати рухи менш точно.

У випадках, коли отримання інформації не є терміновим, на увагу заслуговують так звані системи "store-and-forward", що дозволяють надсилати відеозаписи, зображення та інші файли до віддаленого пристрою зберігання даних, з якого вони можуть бути отримані та відтворені пізніше. Системи, що працюють у масштабі реального часу, з підвищеними вимогами до пропускну здатності та високоякісними, недоцільні для цього випадку.

Для телемедичних додатків можливо використовувати різні технології нижчих рівнів OSI (у цьому випадку маються на увазі L1, L2), що впливає на смугу пропускання та вартість системи. У світі дуже часто застосовують телефонні лінії через їхнє поширення та порівняно низьку вартість. Звичайні мідні телефонні лінії мають порівняно вузьку смугу пропускання. Оскільки ними великі обсяги інформації передаються повільно, їх застосовують для звичайних телефонних переговорів та систем store-and-forward.

Сьогодні поширюється використання кабельних мідних та оптичних ліній та відповідних протоколів, що здатні забезпечити відчутно більші пропускну здатності. Попри те, що ці лінії треба прокладати та встановлювати відповідне устаткування, потреби обслуговувати великі потоки інформації та існуючі транспортні мережі формують тенденцію модернізації інфраструктури мереж зв'язку в медичних закладах. Приклади необхідних ресурсів для різних телемедичних додатків подано у таблиці.

**Файли та необхідні ресурси для різних телемедичних сервісів**

Телемедичні додатки 1	Розміри файлів (може варіюватись) 2	Бажаний результат (може варіюватись) 3
File and Print Services	Варіюється	Віддалений друк документів
TeleDiabetic Retinopathy Screening	5 Мбайт/зображення; 4 зображень/дослідження; 8 пацієнтів/день	Передавання 160 Мбайт для досліджень за час до 2 хвилин
TeleEchocardiology	3 Мбайт/зображення; 3–150 зображень/дослідження; 6 пацієнтів/день	Передавання 450 Мбайт для досліджень за час до 10 хвилин, можлива потреба у відеоконференції
TelePathology	3 Мбайт/зображення; 3–150 зображень/дослідження; 6 пацієнтів/день	Передавання 450 Мбайт для досліджень за час до 10 хвилин, можлива потреба у відеоконференції
Computerized Radiography (CR)	10 Мбайт/зображення; 3 зображення/дослідження;	Передавання 30 Мбайт файлів за час до 10 хвилин
Computed Tomography (CT)	510 кбайт/зображення; 80 зображень/дослідження (chest CT) ; 120 зображень/дослідження (head CT); 140 зображень/дослідження (body CT); 300 зображень/дослідження (multi-slice CT)	Передавання 72 Мбайт файлів за час до 10 хвилин
MRI	300 кбайт/зображення; 350 зображень/дослідження	Передавання 105 Мбайт файлів за час до 15 хвилин
Ultrasound	250 кбайт/зображення; 30 зображень/дослідження	Передавання 7,5 Мбайт файлів за час до 5 хвилин
Mammography	39 Мбайт/зображення; 2 зображення/дослідження	Передавання 78 Мбайт файлів за час до 10 хвилин

1	2	3
TeleConsults з використанням HD відеоконференцій за стандартом H.323	384 кбіт/с – 1,9 Мбіт/с	Відеоконференція прийнятної для проведення діагностики якості
Remote Desktop Management	500 кбіт/с на користувача; 5 користувачів	SSL-VPN з 5 користувачами
Voice-over-IP	17 кбіт/с; 20 користувачів	Високоякісні дзвінки, гарантована низька затримка та надійність
Web-Streamed Medical Education to 200 participants from UTN core	192 кбіт/с для трансляції	200+ web трансляцій на ядрі UTN
Off-site data and medical backups	1 Гбайт/архів щодня	Передавання за час до 60 хвилин

Супутникові системи пропонують додаткові можливості для передавання значних обсягів інформації на великій швидкості, але зависокі капітальні витрати на їхнє впровадження роблять їх непривабливими для багатьох застосувань у телемедицині. З іншого боку, вони дають змогу передавати інформацію між об'єктами на відстанях у випадках, коли немає можливості користуватись фіксованими мережами зв'язку. Прикладами таких об'єктів є кораблі, військові одиниці тощо.

Можливе значне поширення в телемедицині технологій програмно конфігурованих мереж (Software Defined Networks, SDN) та віртуалізації мережевих функцій (Network Functions Virtualization, NFV), що розвиваються швидкими темпами. Згідно з парадигмою, що ґрунтується на цих технологіях, сервіси на кшталт описаної вище системи автоматизованого розпізнавання стадій сну за енцефалограмами можуть бути реалізовані у вигляді додатків, що працюють на серверах великої обчислювальної потужності у центрах обробки даних, доступ до яких надається медичним закладам. Саме на цих серверах централізовано виконуються всі обчислення, а медичний працівник отримує вихідні дані. Це дає змогу ефективно використовувати телемедичну мережу, а також уникнути необхідності розташовувати у медичних закладах власні обчислювальні ресурси. Концепція програмно конфігурованих мереж також передбачає підвищену гнучкість та надійність мережі, а також ефективне використання обчислювальних та мережевих ресурсів якраз у тому обсязі часу та пропускну здатності, який необхідний для цього випадку.

Організація інформаційних процесів у телемедицині на основі технології SDN уможлиблює використання телемедичних процедур та додатків у щоденній практиці медичних закладів різних рівнів. Зазначимо, що впровадження цих технологій вимагає модернізації наявних мереж та заміну (часткову або повну) мережевого обладнання на таке, що підтримує протокол OpenFlow. Ринок SDN поки що перебуває на стадії розвитку, але вже представлений широким спектром рішень, серед яких наявні як пропріетарні пропозиції від провідних вендорів (Cisco, Juniper тощо), так і відкрите програмне та апаратне забезпечення.

### Висновки і перспективи подальших наукових розвідок

Розглянуто особливості методу розпізнавання випадкових сигналів, що може бути використаний у задачах дистанційної діагностики захворювань за електрофізіологічними сигналами. Запропоновано алгоритм автоматизованого розпізнавання стадій сну за відліками ЕЕГ, який можна використовувати для діагностики захворювань головного мозку, нервової та серцево-судинної систем пацієнтів. Алгоритм розпізнавання може бути реалізовано програмно на ЕОМ у системі підтримки прийняття рішень в телемедицині для дистанційної постановки діагнозу пацієнту за ЕЕГ, що передані відповідними каналами зв'язку. Розглянуто особливості вибору пропускну здатностей та відповідних телекомунікаційних технологій для передавання медичної інформації у телемедицині.

1. Field M. J. *Telemedicine: A Guide to Assessing Telecommunications in Health Care*. Washington (DC): National Academies Press (US); 1996. 2. Безрук В. М., Певцов Г. В. *Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля: Монография*. – Харьков: Коллегиум, 2007. – 430 с. 3. Безрук В. М., Коваленко Н. П., Лысенко В. А. *Об одном методе распознавания стадий сна по электроэнцефалограммам на основе авторегрессионной модели // Бионика интеллекта*. – 2005. – № 1. – С. 45–48.