

УДК 621.3

А. Я. КУЛИК, Б. Ф. КОВАЛЬ, Т. Г. РЕВІНА, М. В. БОДНАР

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАТИВНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ СТІЙКОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В ЗАДАЧАХ ТЕЛЕМЕДИЦИНИ

*Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова,  
вул. Пирогова, 56, м. Вінниця, 21018, Україна,  
E-mail: kulyk@vntu.edu.ua*

**Анотація.** Аналіз системи передавання інформації проведено за умови ідентифікації інформативного сигналу згідно критерію Котельнікова. Це дозволило визначити співвідношення *сигнал/шум* на вході і виході каналу зв'язку, а також імовірності помилок ідентифікації елементарного сигналу для різних умов передавання.

**Ключові слова:** співвідношення *сигнал/шум*, критерій Котельнікова, імовірність помилки ідентифікації, телемедицина.

**Аннотация.** Анализ системы передачи информации проведен при условии идентификации информативного сигнала согласно критерия Котельникова. Это позволило определить соотношение *сигнал/шум* на входе и выходе канала связи, а также вероятности ошибок идентификации элементарного сигнала для разных условий передачи.

**Ключевые слова:** соотношение *сигнал/шум*, критерий Котельникова, вероятность ошибки идентификации, телемедицина.

**Abstract.** An analysis of the information transmission system was carried out under the condition of informative signal identification according to the Kotelnikov criterion. This allowed us to determine the signal-to-noise ratio at the input and output of the communication channel, as well as the probability of errors in the identification of an elementary signal for different transmission conditions.

**Key words:** signal-to-noise ratio, Kotelnikov criterion, probability of identification error, telemedicine.

### ВСТУП

Різноманітність умов, в яких знаходиться людина, не дозволяє в повній мірі реалізувати його право на отримання відповідної медичної допомоги в потрібному місці і у потрібний час. Виникає гостра необхідність в об'єднанні зусиль природних, технічних і суспільних наук для забезпечення у прийнятному вигляді цього права людини. Базою такого об'єднання виступає відносно новий напрямок – телемедицина. Цей термін був введений до медичної літератури в 1974 році [1].

В теперішній час ця галузь швидко розвивається. Разом з тим, існує цілий ряд проблем, пов'язаних з тим, телемедицина створена на стику різних наук. Так, увага приділяється суто соціальним аспектам [2], питанням захисту інформації [3] з точки зору законодавства або технічним аспектам [4]. Але вважається, що оскільки напрямком базується на використанні комп'ютерних мереж, то технічні питання можна не розглядати. В монографії, присвяченій розгляду різних питань телемедицини [5], з точки зору передавання інформації увага приділена лише радіоканалам, причому супутниковим. При цьому не враховується, що сучасні комп'ютерні мережі можуть будуватися на базі різноманітних каналів: дротових, оптичних, радіоканалів тощо. Крім цього передавання інформації для вирішення задач телемедицини має певні особливості. В першу чергу це пов'язано із високою вірогідністю передавання інформації.

**Метою роботи** є визначення енергетичних характеристик елементарного сигналу при заданій імовірності помилок його ідентифікації для різних умов передавання.

### ІДЕНТИФІКАЦІЯ ІНФОРМАТИВНИХ СИГНАЛІВ

Під час приймання інформації з реалізацією оптимального приймача Котельнікова, імовірність помилки визначення сигналу описується виразом

$$\begin{aligned}
 p_{ном} &= p(X_1) \cdot \left( 1 - F \left( \frac{h}{2} - \frac{1}{h} \ln \frac{p(X_0)}{p(X_1)} \right) \right) + p(X_0) \cdot \left( 1 - F \left( \frac{h}{2} - \frac{1}{h} \ln \frac{p(X_0)}{p(X_1)} \right) \right) = \\
 &= p(X_1) \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{h}{2} - \frac{1}{h} \ln \frac{p(X_0)}{p(X_1)}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) + p(X_0) \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{h}{2} - \frac{1}{h} \ln \frac{p(X_0)}{p(X_1)}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right). \quad (1)
 \end{aligned}$$

Формула (1) характеризує процес передавання інформації у випадку, коли відсутнє згасання сигналів, їх поглинання тощо. В сучасній літературі багато уваги приділяється розгляду питань ідентифікації сигналів для різних умов та аналізу систем з точки зору співвідношення *сигнал/шум* [6], причому розгляд здійснюється з метою перехоплення інформації чи захисту від цього і зовсім не враховує особливостей телемедицини. Умовою ідентифікації є більша величина повної апостеріорної імовірності приймання сигналу порівняно з апостеріорними імовірностями другого сигналу чи їх відсутності. Фактично це характеризує помилку I роду.

Оскільки за час  $\tau$  приймається лише один сигнал чи констатується їх відсутність, повна апостеріорна імовірність приймання сигналів дорівнює сумі

$$p(X_+/ \hat{X}) + p(X_-/ \hat{X}) + p(X_0/ \hat{X}) = 1, \quad (2)$$

де  $p(X_+/ \hat{X})$  – апостеріорна імовірність ідентифікації імпульсу позитивного рівня за умови приймання сигналу  $\hat{X}$ ;

$p(X_-/ \hat{X})$  – апостеріорна імовірність ідентифікації імпульсу негативного рівня за умови приймання сигналу  $\hat{X}$ ;

$p(X_0/ \hat{X})$  – апостеріорна імовірність ідентифікації імпульсу нульового рівня за умови приймання сигналу  $\hat{X}$ .

Залежно від алгоритму кодування рівні напруги сигналів можуть втілювати різні значення, тому чіткої відповідності нулям та одиницям кодової комбінації на цьому етапі не існує. Сигнал позитивної полярності вважається прийнятим, якщо виконується умова

$$p(X_+/ \hat{X}) > p(X_-/ \hat{X}) + p(X_0/ \hat{X}). \quad (3)$$

Аналогічно можна записати умови ідентифікації негативного сигналу або їх відсутності

$$p(X_-/ \hat{X}) > p(X_+/ \hat{X}) + p(X_0/ \hat{X}), \quad (4)$$

$$p(X_0/ \hat{X}) > p(X_+/ \hat{X}) + p(X_-/ \hat{X}). \quad (5)$$

Апостеріорна імовірність ідентифікації сигналу  $X_+$  дорівнює

$$\begin{aligned}
 p(X_+/ \hat{X}) &= p(X_+) \cdot \exp \left( -\frac{1}{G_\xi} \int_0^\tau (\hat{X}(t) - X_+(t))^2 dt \right) = \\
 &= p(X_+) \cdot \exp \left( -\frac{1}{G_\xi} \int_0^\tau \hat{X}^2(t) dt + \frac{2}{G_\xi} \int_0^\tau \hat{X}(t) \cdot X_+(t) dt - \frac{1}{G_\xi} \int_0^\tau X_+^2(t) dt \right)
 \end{aligned} \quad (6)$$

або

$$p(X_+/ \hat{X}) = p(X_+) \cdot \exp \left( -\frac{E_n}{G_\xi} + \frac{2}{G_\xi} \int_0^\tau \hat{X}(t) \cdot X_+(t) dt - \frac{E_+}{G_\xi} \right), \quad (7)$$

де  $E_n = \int_0^\tau \hat{X}^2(t) dt$  – енергія прийнятого сигналу;

$E_+ = \int_0^\tau X_+^2(t) dt$  – енергія ідеального позитивного імпульсу.

Для сигналів  $X_-$  та  $X_0$  відповідно

$$p(X_-/ \hat{X}) = p(X_-) \cdot \exp \left( -\frac{1}{G_\xi} \int_0^\tau (\hat{X}(t) - X_-(t))^2 dt \right) =$$

$$= p(X_-) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi} - \frac{2}{G_\xi} \int_0^\tau \hat{X}(t) \cdot X_-(t) dt - \frac{E_-}{G_\xi}\right). \quad (8)$$

$$p(X_0/\hat{X}) = p(X_0) \cdot \exp\left(-\frac{1}{G_\xi} \int_0^\tau (\hat{X}(t) - X_0(t))^2 dt\right) = p(X_0) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right) \quad (9)$$

за умови, що амплітуда сигналу  $X_0$  дорівнює нулю. Під час передавання інформативних сигналів  $X_+$  та  $X_-$  обов'язково буде виконуватись умова

$$p(X_+/\hat{X}) + p(X_-/\hat{X}) > p(X_0/\hat{X}). \quad (10)$$

тоді з урахуванням (7) – (9) можна записати

$$p(X_+) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right) + p(X_+) \cdot \exp\left(-\frac{2}{G_\xi} \int_0^\tau \hat{X}(t) \cdot X_+(t) dt\right) + p(X_+) \cdot \exp\left(-\frac{E_+}{G_\xi}\right) + p(X_-) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right) + p(X_-) \cdot \exp\left(-\frac{2}{G_\xi} \int_0^\tau \hat{X}(t) \cdot X_-(t) dt\right) + p(X_-) \cdot \exp\left(-\frac{E_-}{G_\xi}\right) > p(X_0) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right). \quad (11)$$

Під час підготовки до процесу передавання інформативні сигнали формуються таким чином, що каналний сигнал повинен бути не лише біполярним, але й імовірності появи позитивних та негативних імпульсів мають бути однаковими. Це дозволяє зменшити вплив міжсимвольних завад другого роду. Вигляд спектра сигналу при цьому не змінюється, тому на розрахунки це не впливатиме. З метою підвищення вимог до системи і створення певного запасу надійності, можна вивести з лівої частини

нерівності (2.78) дві складові та нерівність (11) набуває вигляду

$$p(X_c) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right) + p(X_c) \cdot \exp\left(-\frac{E_c}{G_\xi}\right) + p(X_c) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right) + p(X_c) \cdot \exp\left(-\frac{E_c}{G_\xi}\right) > p(X_0) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right), \quad (12)$$

де  $E_c$  – енергія інформативного імпульсу.  
або:

$$2p(X_c) \cdot \exp\left(-\frac{E_c}{G_\xi}\right) > (p(X_0) - 2p(X_c)) \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{G_\xi}\right), \quad (13)$$

$$\ln(2p(X_c)) - \frac{E_c}{G_\xi} > \ln(p(X_0) - 2p(X_c)) - \frac{E_n}{G_\xi}. \quad (14)$$

Кінцевою умовою співвідношення *сигнал/шум* при формуванні інформативного сигналу передавача буде

$$\frac{E_c}{G_\xi} > \frac{E_n}{G_\xi} + \ln(2p(X_c)) - \ln(2p(X_c) - p(X_0)), \quad (15)$$

або з урахуванням метрики біполярного сигналу

$$h_{nep}^2 > h_{np}^2 + 2 \ln 2p(X_c) - 2 \ln(2p(X_c) - p(X_0)), \quad (16)$$

де  $h_{nep}^2$  – співвідношення *сигнал/шум* на виході передавача,

$h_{np}^2$  – співвідношення *сигнал/шум* на виході приймача.

## РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Таким чином, співвідношення (16) дозволяє визначити співвідношення *сигнал/шум* на виході передавача відносно входу приймача з урахуванням впливу білого шуму на інформативний сигнал та апіорних імовірностей інформативних сигналів без врахування згасання сигналу в каналі зв'язку (рис. 1).

Залежність імовірності помилки ідентифікації сигналу від співвідношення *сигнал/шум* для різних видів синхронізації ілюструються рис. 2.

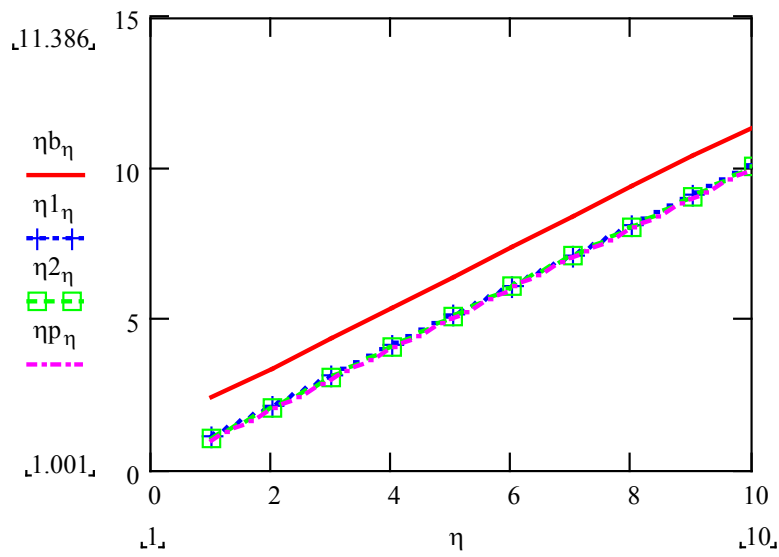


Рис. 1. Залежність співвідношень *сигнал/шум* на виході передавача  $\eta_k = h_{per}^2$

і вході приймача  $\eta = h_{pr}^2$  для різних видів синхронізації:

- $\eta b_k$  – передавання інформації бітами;
- $\eta 1_k$  – синхронізація з одним синхросимволом;
- $\eta 2_k$  – синхронізація з двома синхросимволами;
- $\eta p_k$  – передавання інформації блоками у 1000 біт.

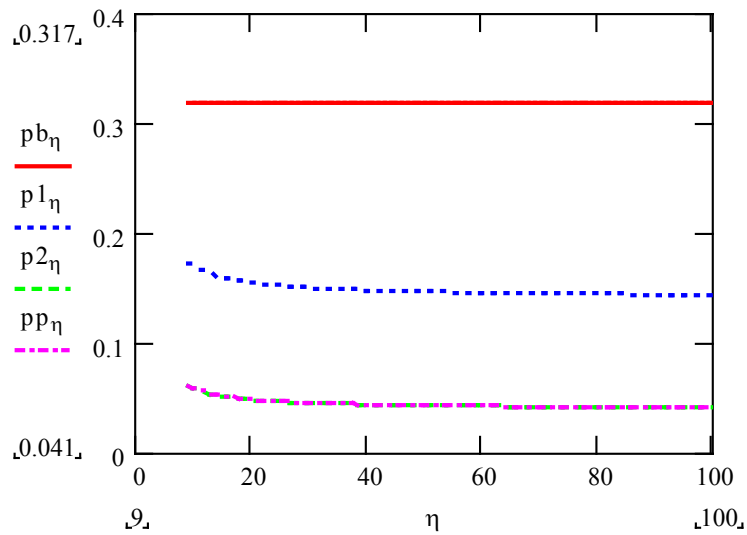


Рис. 2. Залежність імовірності помилки ідентифікації *сигналу* від співвідношення *сигнал/шум* для різних видів синхронізації:

- $pb_\eta$  – передавання інформації бітами;
- $p1_\eta$  – синхронізація з одним синхросимволом;
- $p2_\eta$  – синхронізація з двома синхросимволами;
- $pp_\eta$  – передавання інформації блоками у 1000 біт.

Залежність імовірності помилки ідентифікації сигналу передавання від імовірності появи інформативного сигналу при різних значеннях співвідношення *сигнал/шум* (рис. 3) показує вплив розміру інформаційного блоку, що передається каналом зв'язку на результат ідентифікації.

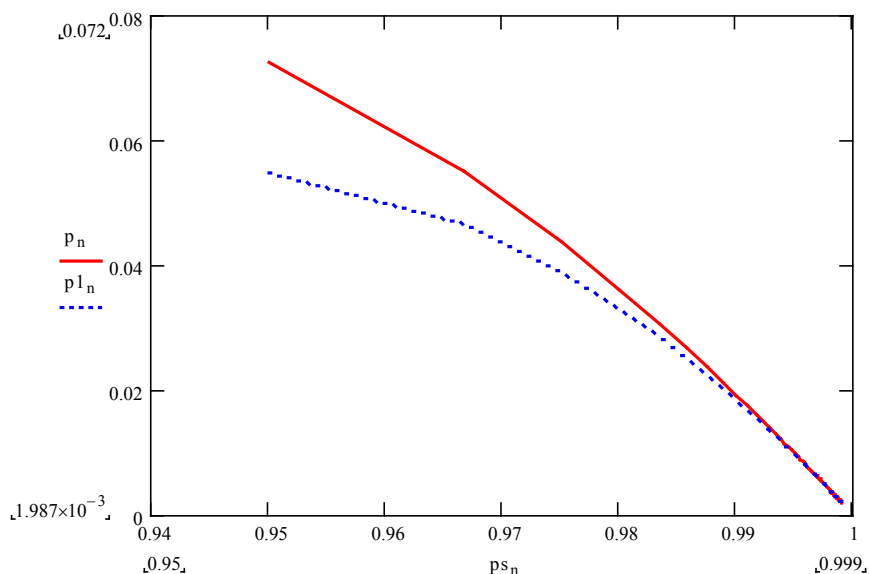


Рис. 3. Залежність імовірності похибки ідентифікації сигналу від імовірності появи сигналу  $p(X_c)$ :

$p_n$  – співвідношення *сигнал/шум*  $h^2 = 10$ ;

$p_{1n}$  – співвідношення *сигнал/шум*  $h^2 = 15$ .

### ВИСНОВКИ

Отримані співвідношення дозволяють в залежності від похибки ідентифікації інформативних сигналів вибирати оптимальне співвідношення *сигнал/шум* і будувати адаптивну систему передавання інформації для забезпечення завданої вірогідності її передавання, що дуже важливо для задач телемедицини.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mark R. G. Telemedicine system: the missing link between homes and hospital? / R. G. Mark // Mod. Ners. Home. – 1974. – № 32(2). – Pp. 39-42.
2. Ермошкин Н. Н. Перспективы реформы системы здравоохранения – эволюция или революция? / Н. Н. Ермошкин // Клиническая информатика и телемедицина. – 2004. – № 2. – С. 227-236.
3. Домарев В. В. Защита информации в медицинских информационных системах: врачебная тайна и современные информационные технологии / В. В. Домарев // Клиническая информатика и телемедицина. – 2004. – № 2. – С. 147-154.
4. Пенкин Ю. М. Применение программно-аппаратных средств защиты информации в телемедицине / Ю. М. Пенкин, В. Г. Кучеренко, А. Г. Литвинов, Г. И. Хаара // Клиническая информатика и телемедицина. – 2017. – № 13. – С. 113-118.
5. Телемедицина. Новые информационные технологии на пороге XXI века / под ред. Р. М. Юсупова, Р. И. Полонникова. – С.-Пб: Анатолия, 1998. – 487 с. – ISBN 5-7452-0018-9.
6. Кветний Р. Н. Методи та засоби передавання інформації у проблемно-орієнтованих розподілених комп'ютерних системах / Р. Н. Кветний, А. Я. Кулик. – Вінниця: ВНТУ. – 2010. – 362 с. – ISBN 978-966-641-372-0.

### REFERENCES

1. Mark R. G. Telemedicine system: the missing link between homes and hospital? / R. G. Mark // Mod. Ners. Home. – 1974. – № 32(2). – Pp. 39-42.
2. Ermoshkin N.N. The role of integrated technology solution in healthcare reform / Ermoshkin N.N. // Clinical Informatics and Telemedicine. – 2004. – № 2. – Pp. 227-236.

3. Domarev V. V. Protection of the information in medical information system: medical secret and modern information technologist / V. V. Domarev // *Klinical Informatics and Telemedicine*. – 2004. – № 2. – Pp. 147-154.
4. Penkin Yu. M. Hardware and software tools application for information protection in telemedicine / Yu. M. Penkin, V. G. Kucherenko, A. G. Litvinov, G. I. Khara // *Klinical Informatics and Telemedicine*. – 2017. – № 13. – Pp. 113-118.
5. *Telemedicine. New information technology on a threshold of XXI century* / edit. R. M. Yusupov, R. I. Polonnikov. – Saint Petersburg: Anatoliya, 1998. – 487 p. – ISBN 5-7452-0018-9.
6. Kvetnyy R. N. Methods and means of information transfer in problem-oriented distributed computer systems / R. N. Kvetnyy, A. Ya. Kulyk. – Vinnitsia: VNTU. – 2010. – 362 p. – ISBN 978-966-641-372-0.  
Надійшла до редакції 08.08.2017р.

**КУЛИК АНАТОЛІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ** – д.т.н., професор, зав. кафедри біофізики, інформатики та медапаратури, Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, Вінниця, Україна.

**КОВАЛЬ БОРИС ФЕДОРОВИЧ** – ст. викладач кафедри біофізики, інформатики та медапаратури, Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова, Вінниця, Україна.

**РЕВІНА ТЕТЯНА ГРИГОРІВНА** – асистент кафедри біофізики, інформатики та медапаратури, Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова, Вінниця, Україна.

**БОДНАР МАРІЯ ВІКТОРІВНА** – асистент кафедри біофізики, інформатики та медапаратури, Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова, Вінниця, Україна.