

## БАГАТОКАНАЛЬНА СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У СПЛАЙНОВИХ БАЗИСАХ

© Кутін А.І., 2014

Запропоновано принцип побудови багатоканальної системи передавання даних з використанням сплайнів та проаналізовано статистичні результати дослідження побудованої моделі.

Ключові слова: сплайни, фільтр Савіцького–Голя, LSS-розклад.

A. I. Kutin

Kryvyi Rih College of National Aviation University

## MULTICHANNEL DATA TRANSMISSION SYSTEM IN THE SPLINE BASES

© Kutin A. I., 2014

The article deals with multichannel digital data transmission system in which the digital signal is transmitted through the manipulation of the harmonic function which performs subcarrier function with different frequency for different channels. However, so far as the video signal with rectangular shape is characterized by a wide spectrum, the resulting signal also has a wide spectrum, which is not acceptable for most of communication systems with a large number of channels. In order to limit the occupied bandwidth in the filter the Hermitian cubic spline filter's function is used. The quantity of the points of spline filter is defined according to the task of smoothing of harmonic subcarrier's sampling frequency of different channels. In this paper an analysis of the amplitude-frequency characteristics of spline filters for oddly even number of points has been conducted and the dependence of the filter's bandwidth extension with the points quantity decrease has been revealed. Low slope recession and respectively bad filtering of copies of discrete signal are also typical for the spline's characteristics with the points quantity less than 64. Total signal is the sum of values which come in succession from the interpolators of each of the channels. On the receiving side the separation of channel signals is done by Savitsky-Golay filters. Spline functions which were used for the interpolation on the transmission side (LSS-decomposition) are the basis of given filters. Since the spline filter's frequency response corresponds in shape to a low pass filter the filter's bandwidths with different numbers of points intersect. But that does not prevent the exercise of the corresponding channel selection signal if you follow the order of separation from a more narrowband channel to a more broadband one. For the estimation of stability of the described system of transmission to the operation of additive Gaussian noise and violation of synchronization a two-channel model was built. 128 function points for the channel with higher transmission rate and 512 – for the channel with slower rate were used. The frequencies of the harmonic functions and the sampling frequencies of the channels were selected:  $F_{128} = 16$  Hz,  $f_{s128} = 64$  Hz, for a channel with the number of points 128 and  $F_{512} = 1$  Hz,  $f_{s512} = 16$  Hz, for a channel with the number of points 512. Shift keying period corresponds to the sine waves period what eliminates the open-phase fault. The results of the conducted analysis show transmission system's high stability to the noises but low stability to the deviation of synchronization in the form of a considerable growth of error probability to bit.

Key words: splines, Savitsky-Golay filter, LSS- decomposition.

**Вступ.** Для передавання даних від багатьох джерел по одному каналу зв'язку використовуються різні методи ущільнення та розподілення каналів. До них належать частотне (FDM), часове (TDM) та кодове (CDM) розподілення.

Як різновид реалізації багатоканальної системи з частотним розподілення каналів можна розглядати дует: сплайн інтерполяція – LSS-розклад.

Ідея використання сплайнів у цифрових системах зв'язку не нова. В роботі [1] як сигнали в каналі зв'язку було використано сплайн дефекту один, а в роботі [2] – дефекту три та обидві системи були одноканальними і цифрові сигнали безпосередньо інтерполювались відповідними функціями.

Відмінність цієї роботи полягає у тому, що безпосередньо цифрові сигнали не інтерполюються. Попередньо ними маніпулюється дискретизоване гармонійне коливання певної частоти, різної для кожного з каналів. Ще однією особливістю є те, що кожен з каналів має різну частоту інтерполяції, кратну двійці, що впливає на форму характеристик та швидкість передачі даних у кожному з каналів.

Простота отримання групового сигналу передавача та розділення сигналу у приймачі з використанням повторюваних типових алгоритмів, відсутність використання комплексного перетворення Фур'є надають такій системі певні переваги щодо інших аналогічних систем.

**Постановка задачі.** Об'єктом дослідження є багатоканальна система передачі цифрових даних, в якій груповий сигнал формується алгебраїчним складанням каналних сигналів сформованих з використанням алгоритму інтерполяції функцією ермітового сплайна маніпульованих двійковою послідовністю дискретних гармонійних коливань з різними частотами у каналах. Декомпозиція сигналів на приймальній стороні здійснюється фільтрами Савіцького–Голя, послідовним відніманням від групового сигналу сигналів вже виділених каналів у послідовності зростання в них швидкості передачі. Якість роботи системи буде аналізуватися в умовах дії шумів і випадкового запізнення сигналу синхронізації.

**Багатоканальна цифрова сплайн-система зв'язку.** В узагальненому вигляді система, що розглядається, зображена на рис. 1.

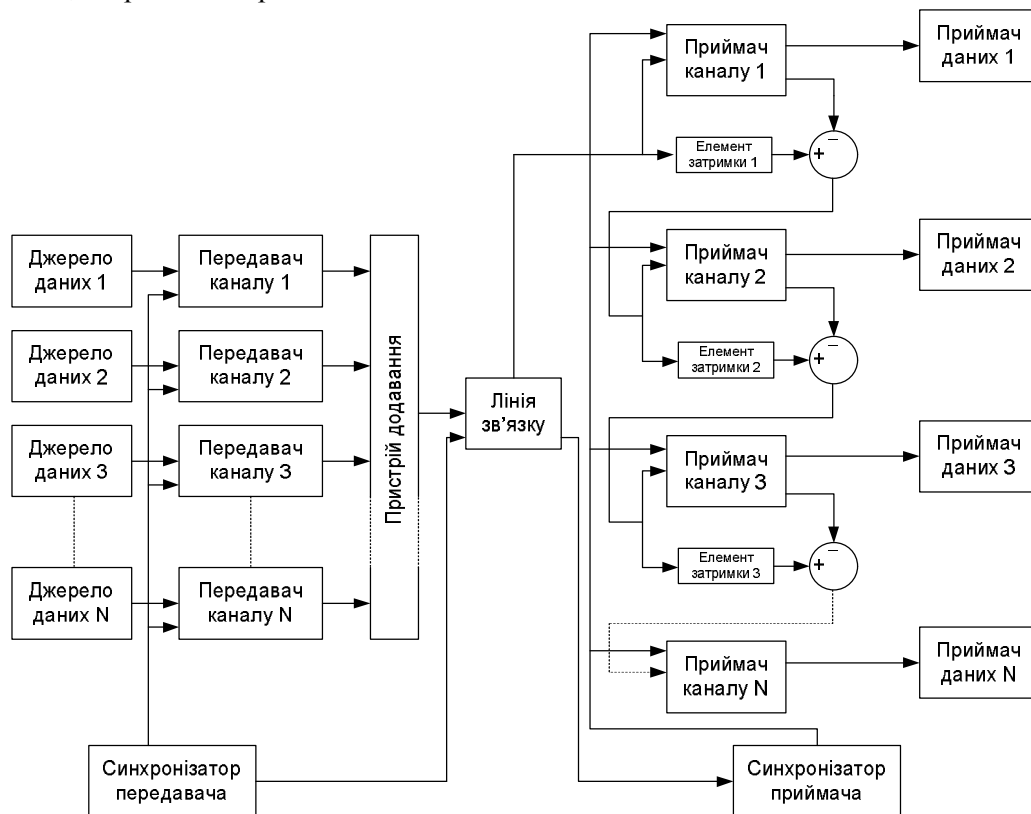


Рис. 1. Структурна схема узагальненої системи передавання у сплайновому базисі

До складу системи входять джерела даних, які формують гармонійне дискретне коливання, проманіпульоване двійковою послідовністю з періодом, що дорівнює періоду синусоїд (це дозволить виключити явище розриву фази, що призведе до значного розширення спектра сигналу кожного з каналів).

Сигнал, що надходить з джерел даних, інтерполюється передавачами кожного з каналів окремо, збільшуючи кількість відліків дискретних синусоїд, тим самим збільшуючи відстань між їх власними копіями у спектрі, й придушує складові вище за певну частоту зрізу (виконуючи також функцію фільтрів нижніх частот).

Необхідною умовою узгодження каналів має бути рівність частоти дискретизації сигналів на виході кожного з передавачів каналів. Для цього має виконатись умова:

$$fs_1 \cdot k_1 = fs_2 \cdot k_2 = fs_3 \cdot k_3 = \dots = fs_N \cdot k_N, \quad (1)$$

де  $fs_1, fs_2, fs_3, \dots, fs_N$  – частоти дискретизації синусоїд у відповідному каналі;  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_N$  – коефіцієнти інтерполяції передавачів каналів.

Отримані каналні сигнали надходять на пристрій додавання, який утворює з них груповий сигнал звичайним алгебраїчним додаванням.

Після проходження через провідну чи безпроводну лінію зв'язку, в якій діють завади, груповий сигнал надходить на приймальну частину системи. В ній з групового сигналу фільтром Савіцького–Голя виділяється сигнал першого каналу в приймачі каналу 1, який повторно інтерполюється і віднімається від затриманого, за допомогою елемента затримки повного групового сигналу. Далі сигнал надходить до приймача каналу 2, який виділяє свій сигнал і віднімає його від вже не повного затриманого групового сигналу. Така сама операція виконується і в третьому, і в наступних каналах.

Сигнал з виходу фільтра Савіцького–Голя каналів представляється відліками дискретних проманіпульованих синусоїд, які зазнали змін внаслідок неповного придушення шуму каналу та неповної компенсації сигналів попередніх каналів. Ці відліки надходять на вхід приймачів даних, що виділяють з них двійкові сигнали.

Робота передавальної та приймальної частин системи керується відповідно тактовими сигналами синхронізатора. Сигнали передавача, поширюючись через канал, зазнають впливу завад, що може призвести до спотворення сигналу синхронізації на приймальній частині.

Амплітудно-частотні характеристики сплайн-інтерполяторів для кількості точок: 512, 256, 128, 64, 32 зображено на рис. 2.

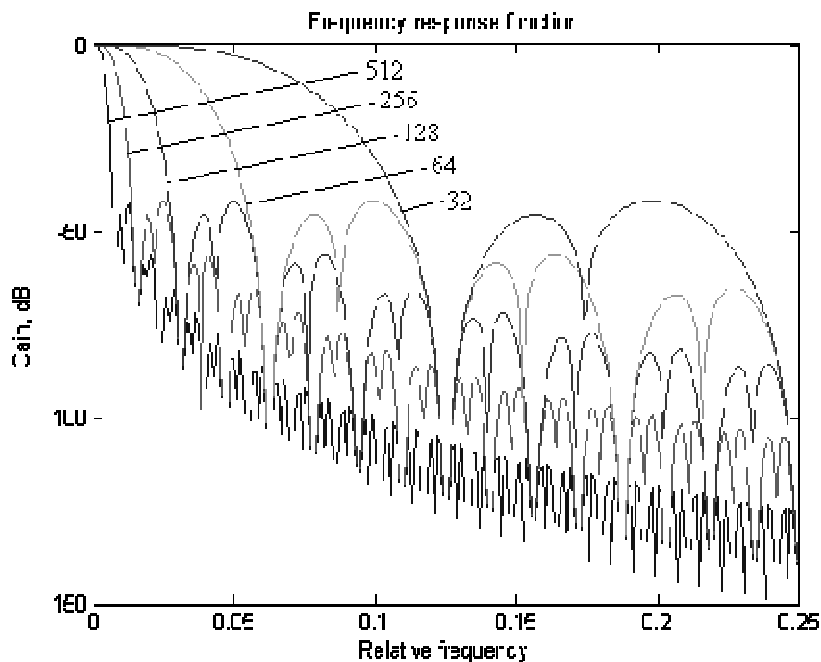


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики сплайн-інтерполяторів для різної кількості точок (по вертикалі – коефіцієнт передачі (дБ), по горизонталі – нормована частота відносно частоти дискретизації)

Амплітудно-частотні характеристики фільтрів Савіцького–Голя зображено на рис. 3 та вказано в табл. 1.

Таблиця 1

**Частотні характеристики інтерполяторів залежно від кількості точок сплайн-функції**

Характеристика \ Кількість точок	32	64	128	256	512
$f_{\text{відносна } -3\text{дБ}}$	0,050781	0,025391	0,012695	0,006348	0,002930
$f_{\text{відносна } -6\text{дБ}}$	0,088867	0,044922	0,022461	0,011231	0,005859

Таблиця 2

**Частотні характеристики фільтрів Савіцького–Голя залежно від кількості точок сплайн-функції**

Характеристика \ Кількість точок	32	64	128	256	512
$f_{\text{відносна } -3\text{дБ}}$	0,084961	0,041992	0,020508	0,0102538	0,0054
$f_{\text{відносна } -6\text{дБ}}$	>>0,5	0,2334	0,10742	0,052734	0,026367

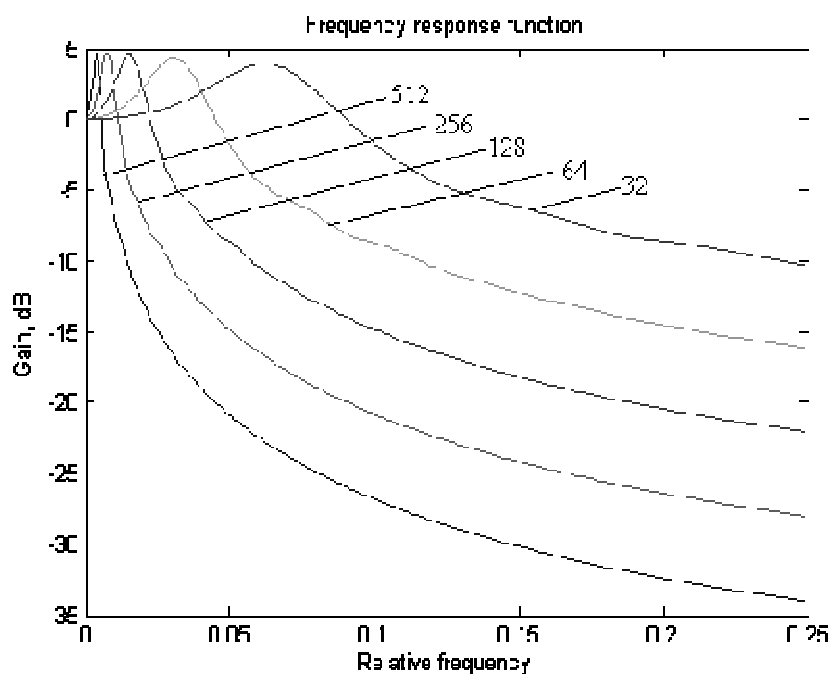


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики фільтра Савіцького–Голя для різної кількості точок утворюючої функції сплайна

Як видно з табл. 1, 2 та рис. 2, 3, збільшення у два рази кількості точок сплайн-функції звужує смугу пропускання удвічі й збільшує крутизну спаду характеристики (збільшується вибірковість), а форма самої характеристики зберігається.

Принцип, на якому основана система, зображена на рис. 1, полягає в тому, що приймач каналу 1, на який надходить сигнал з лінії зв'язку першим, має велику кількість точок, а отже, завдяки кращим характеристикам вибірковості, виділяє лише свій сигнал, значно придушуючи сигнали усіх інших каналів. Виділивши його, він віднімає його від групового, тим самим унеможливаючи попадання у смугу пропускання усіх останніх каналів, які не можуть його придушити (оскільки він міститься у їх смузі прозорості), розділення останніх каналів здійснюється за таким самим принципом.

Зазначимо, що застосування сплайн-фільтрів з малою кількістю точок нераціональне, оскільки у них погані вибіркові властивості (наприклад, 32-точкова сплайн-функція).

Розглянемо як прикладу двоканальну систему, побудовану в програмному середовищі Simulink. В ній канали утворені на основі сплайн-функції з кількістю точок 512 і 128, що забезпечують достатню вибірковість у каналах (рис. 4).

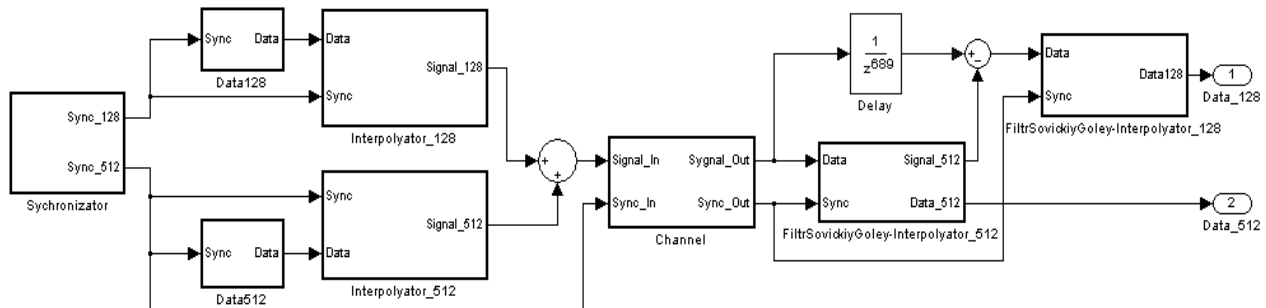


Рис. 4. Двоканальна модель у програмі Simulink

Розглянемо розрахунок сигналів, які використовуються у каналах.

Задамо коефіцієнти інтерполяції в каналах, враховуючи, що сплайни складаються з чотирьох

фрагментів: для каналу 512 –  $k_{512} = \frac{512}{4} = 128$ , для каналу 128 –  $k_{128} = \frac{128}{4} = 32$ .

Задамо частоту дискретизації каналу на 128 точок:

$$fs_{128} = 64 \text{ Гц.}$$

Тоді для каналу на 512 точок зі співвідношення (1) маємо:

$$fs_{512} = \frac{fs_{128} \cdot k_{128}}{k_{512}} = 16 \text{ Гц.}$$

Враховуючи, що згідно з теоремою Найквіста частота сигналів має бути не більша, ніж половина частоти дискретизації, задамо значення дискретизованих частот:  $F_{128} = 16$  Гц та  $F_{512} = 1$  Гц.

Інтервал між відліками інтерпольованих функцій (є одночасно кроком моделювання системи):

$$\Delta t = \frac{1}{fs_{128} \cdot k_{128}} = \frac{1}{fs_{512} \cdot k_{512}} \approx 4,883 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Сигнали, які формуються на виході генераторів даних та сплайн-інтерполяторів, а також сумарний сигнал зображені на рис. 5.

**Проведення первинної обробки експериментальної інформації.** Проаналізуємо вплив на правильність визначення системою переданих значень даних в умовах дії гауссового шуму.

Передаючи однакову кількість даних за різних рівнів відношення сигнал/завада, побудували залежність ймовірності похибки для кожного з каналів.

Як можна було передбачити, використання методу найменших квадратів, мінімізуючи середньоквадратичну помилку, створює умови для протидії гауссовому шуму, виконуючи функцію еквалайзера, що відновлює форму сигналу перед операцією детектування. З характеристик, зображених на рис. 8, видно, що стійкішим є канал з більшою кількістю точок, в якому швидкість передавання даних нижча, а відповідно зміни сигналу відбуваються повільніше, порівняно зі змінами завад (гауссового шуму та сигналу в більш швидкісному каналі). Це можна пояснити тим, що LSS-фільтр, залишаючись фільтром нижніх частот, хоча й з адаптованою до форми сигналу характеристикою, зі зростанням частоти має більшу смугу пропускання, в яку в каналі із більшою

швидкістю входить частина невідфільтрованого сигналу каналу з меншою швидкістю, та шум, потужність якого пропорційна до ширини смуги відповідного каналу.

Втрата половини бітів переданих даних відбувається в каналі 512 за рівня відношення сигнал/завада  $-41$  дБ, а для каналу 128 майже перестає зростати за рівня  $-73,5$  дБ, так і не досягши 50 %.

Залежність ймовірності похибки від величини порушення частоти синхронізації зображено на рис. 9.

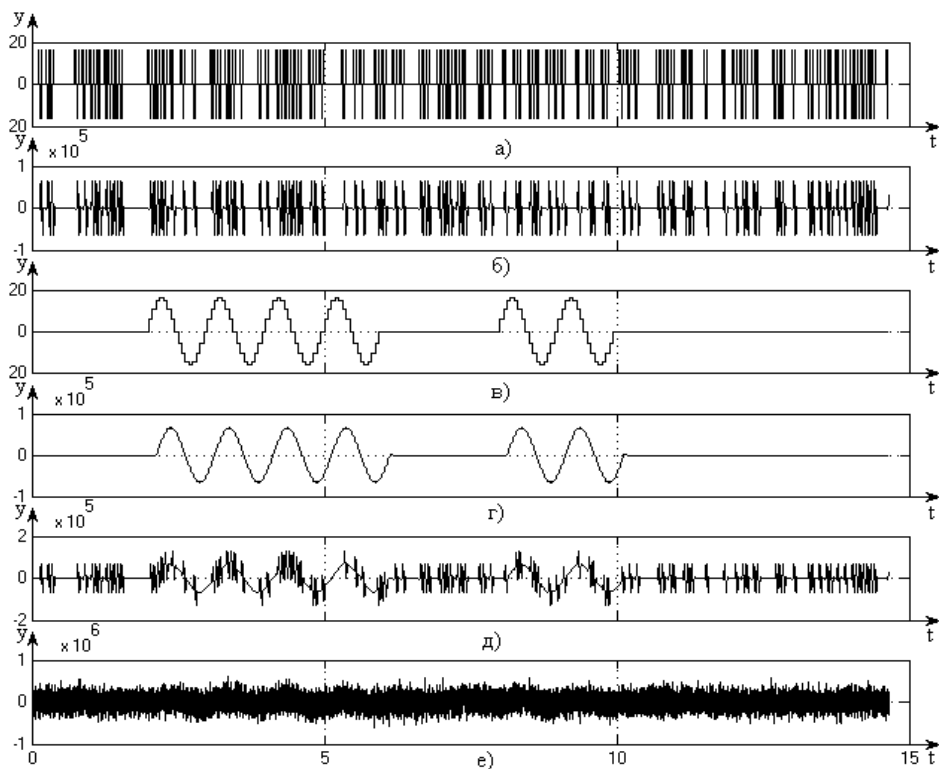


Рис. 5. Сигнал на передавальній частині системи передачі та на виході лінії зв'язку: а – на виході блока даних каналу 128; б – на виході інтерполятора 128; в – на виході блока даних каналу 512; г – сигнал на виході інтерполятора 512; д – сигнал на виході блоку додавання; е – сигнал на виході каналу зв'язку

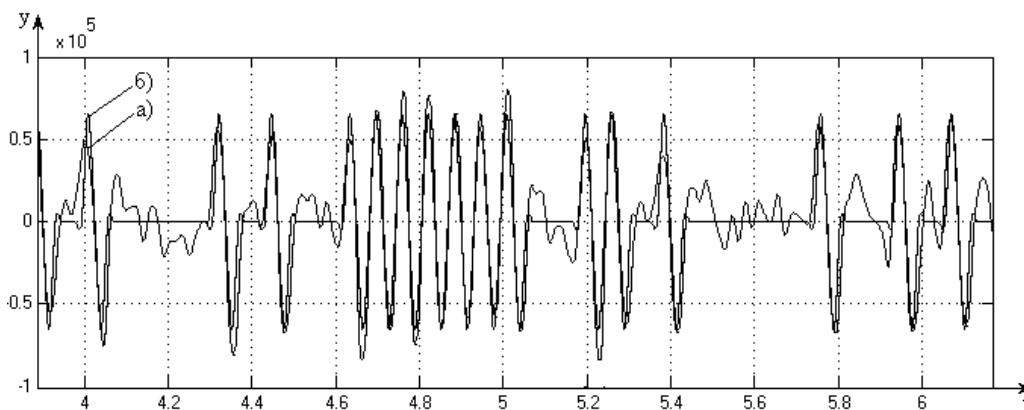


Рис. 6. Сигнал, що передавався по каналу (а) і виділений приймачем (б) каналу 128 за умов дії завад

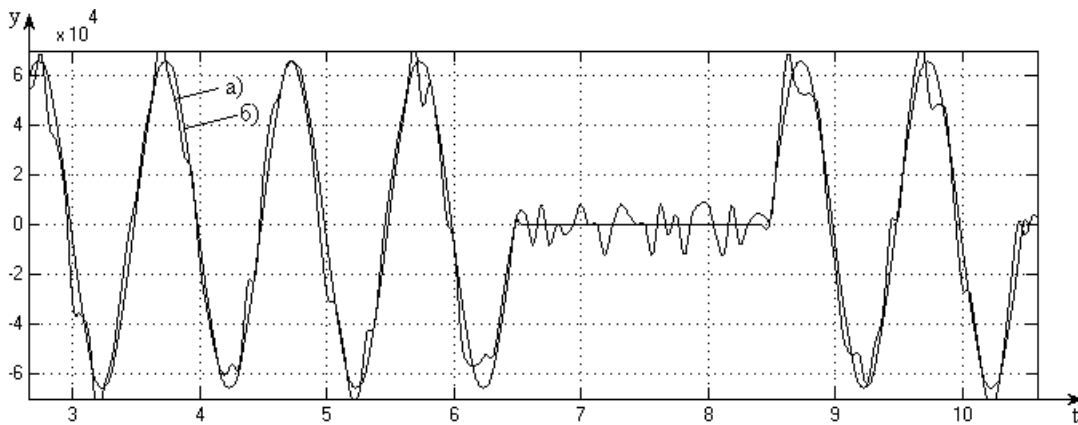


Рис. 7. Сигнал, що передався по каналу (б) і виділений приймачем (а) каналу 512 за умов дії завад

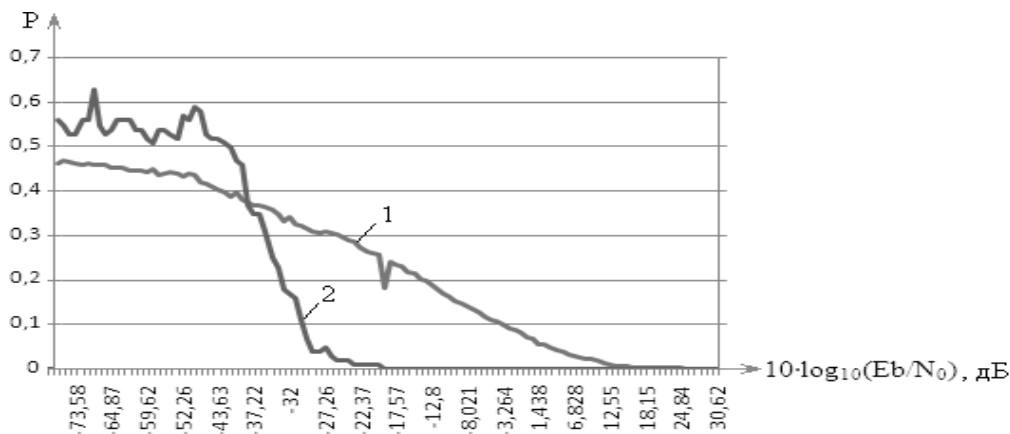


Рис. 8. Залежність оцінки ймовірності похибки ( $P$  – у відносних одиницях) від співвідношення сигнал/завада для каналу 128 (1) і 512 (2)

Для зручності оцінка ймовірності похибки у разі передавання майже 1564 бітів у каналі 128 та 100 бітів у каналі 512 даних зображена залежно від відносної величини  $\Delta$ , що розраховується за формулою:

$$\Delta = \frac{\text{максимальне значення відхилення модельного часу}}{128} \cdot 100 \% .$$

Знаменником є кількість періодів модельного часу в інтервалі між синхросигналами каналів. Чисельник – величина від 0 до 128, пропорційна до максимального відхилення положення синхросигналу від його дійсного положення у кількості періодів модельного часу, заданій за допомогою генератора випадкових чисел з рівномірним розподілом ймовірностей значень.

Залежність значення  $\Delta$  від відхилення в періодах модельного часу, створеного лініями затримки (з кроком затримки 16 м.ч.), подано в табл. 3.

Таблиця 3

Залежність величини  $\Delta$  від відхилення періоду синхросигналу

Відхилення періоду, м.ч.	$\Delta$ , %
0	0
16	12,5
32	25
48	37,5
64	50
80	62,5
96	75
112	87,5
128	100

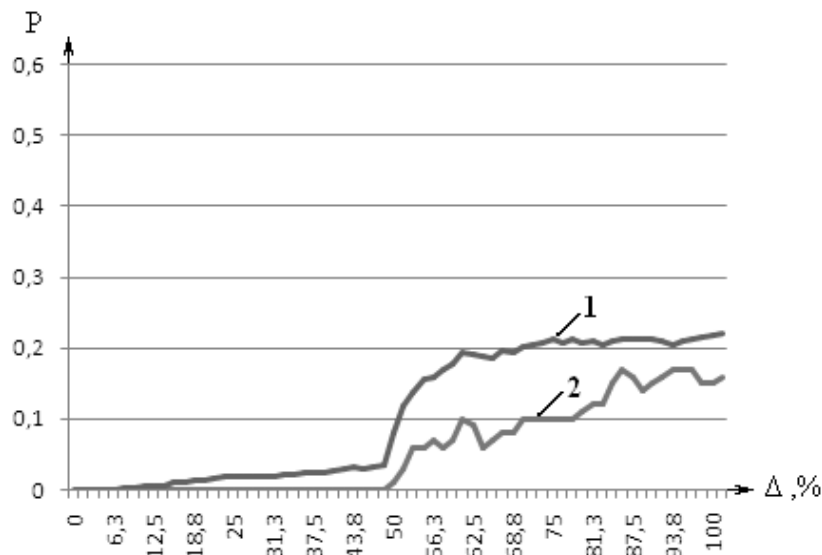


Рис. 9. Залежність оцінки ймовірності похибки ( $P$  – у відносних одиницях) від величини порушення частоти синхронізації (у відсотках) для каналів 128 (1) і 512 (2)

Як видно з графіків, кількість помилок за максимального відхилення зростає повільно до значення 50 %, а потім різко погіршується здатність розпізнавати значення бітів обох каналів. Проте ймовірність похибки при передачі 1600 бітів у каналі 128 і 100 бітів у каналі 512 за той самий час моделювання лише трохи перевищує 22 %.

**Висновки.** Використання алгоритму кубічної сплайн-інтерполяції і LSS розклад з різною кількістю точок у фрагментах дає змогу реалізувати багатоканальні системи передавання цифрових сигналів.

Під час проектування інтерполяторів і фільтрів каналів раціонально використовувати лише сплайн-функції з великою кількістю точок, оскільки вибіркковість сигналу цього каналу щодо сусідніх каналів зростає пропорційно до їх кількості.

Для формування сигналів, що несуть двійкову інформацію, слід використовувати інтерполяцію не самої двійкової послідовності, а маніпульовані гармонійні коливання, частоти дискретизації яких при інтерполяції мають стати рівними, що дозволить узгодити канали системи і зменшити смугу займаних частот.

Стійкість системи до завад, пропорційна до ширини каналу, знижується зі збільшенням кількості точок, але за допомогою сучасних завадостійких алгоритмів може бути покращена. Порушення синхронізації починає суттєво впливати на роботу системи за відхилень, більших від половини періоду синхросигналів, але призводить до втрати не більше ніж чверті переданих даних.

Отже, використання сплайнів у багатоканальних системах зв'язку є достатньо перспективним, але потребує пошуку оптимальнішої, з погляду використання частотного ресурсу каналу та завадостійкості, базисної функції.

1. Ibáñez J., Pantaleón C., Díez J. Spline pulse-shaping with ISI-free matched filter receiver // XI European Signal Processing Conference (Eusipco 2002), Toulouse, France. – 2002. – P. 365–368.
2. Бойко І. Ф., Гордєєв М. Г. Кутін А. І. Передавання і приймання цифрових сигналів у сплайнових базисах // Електроніка та системи управління: зб. наук. праць. – К.: НАУ, 2012. №3 (33) – С. 5–12.
3. Шелевицький І. В., Шутко М. О., Шутко В. М., Колганова О. О. Сплайни в цифровій обробці даних і сигналів. – К.: НАУ, 2008. – 232 с.
4. Дьяконов В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384 с.
5. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М. М. MATLAB 7: программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.