

Ярцев В.П., Гололобов Д.О., Котомчак О.Ю., Сударева О.В., Сеньков О.В.
Державний університет телекомунікацій, Київ

ПРИСТРІЙ ДЛЯ УСУНЕННЯ МІЖСИМВОЛЬНОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ СИГНАЛІВ У ВОЛОКОННО - ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано апаратна реалізація пристрою цифровій обробки сигналів для усунення впливу міжсимвольної інтерференції у ВОЛЗ з використанням методів ймовірнісного опису змішаної вибірки випадкових величин. Показано модель адаптації демодулятора, яка зводиться до обчислення зваженої суми 4 відліків вхідного сигналу і порівняння отриманої суми з порогом. Визначено основні операції по адаптації регенератора при демодуляції сигналів, перекручених міжсимвольною інтерференцією, у конкретних умовах передачі у ВОЛЗ, які формулюються з точки зору статистичної теорії сумішей як завдання оцінювання деяких параметрів розподілу ймовірностей суміші

Ключові слова: статистична теорія сумішей, волоконно-оптичні лінії зв'язку, міжсимвольної інтерференції сигналів, адаптація демодулятора, регенератор оптичного сигналу.

Yartsev V. P., Hololobov D. O., Kotomchak O. Yu., Sudareva O. V., Senkov O. V.
State University of Telecommunications, Kiev

DEVICES FOR ELIMINATION INTERIMPLATIVE INTERFERENCE SIGNALS IN FIBERS - OPTIC COMMUNICATION LINES

The hardware implementation of the digital signal processing device for elimination the effects of inter-character interference in the FOCL is proposed using the methods of probabilistic description of mixed random sample selection. The model of demodulator adaptation is shown, which is reduced to calculating the weighted sum of 4 samples of the input signal and comparing the received sum with the threshold. The basic operations for adaptation of the regenerator during demodulation of signals distorted by inter-character interference are determined under specific conditions of transmission in the FOCL, which are formulated from the point of view of statistical mixture theory as a task of estimating some parameters of the probability distribution of the mixture. The structural scheme of the optical signal regenerator is given, the requirements for the time parameters of the analog-to-digital converters are determined, the simulation results are added, the procedure of digital processing for the adaptation of the devices of recognition of discrete signals transmitted in the FOCL is determined.

Keywords: statistical mixture theory, fiber optic communication lines, inter-symbol signal interference, demodulator adaptation, optical signal regenerator.

Ярцев В. П., Гололобов Д. А., Котомчак А.Ю., Сударева О.В., Сеньков О.В.
Государственный университет телекоммуникаций, Киев

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Предложена аппаратная реализация устройства цифровой обработки сигналов для устранения влияния межсимвольной интерференции в ВОЛС с использованием методов вероятностного описания смешанной выборки случайных величин. Показана модель

© Ярцев В.П., Гололобов Д.О., Котомчак О.Ю., Сударева О.В., Сеньков О.В. 2019

адаптації демодулятора, которая сводится к вычислению взвешенной суммы 4 отсчетов входного сигнала и сравнению полученной суммы с порогом. Определены основные операции по адаптации регенератора при демодуляции сигналов, искаженных межсимвольной интерференцией в конкретных условиях передачи в ВОЛС, которые формулируются с точки зрения статистической теории смесей как задача оценки некоторых параметров распределения вероятностей смеси

Ключевые слова: статистическая теория смесей, волоконно-оптические линии связи, междусимвольной интерференции сигналов, адаптация демодулятора, регенератор оптического сигнала.

1. Вступ

Збільшення пропускної здатності інформаційних мереж потребує подальшого вдосконалення елементів волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Боротьба з впливом міжсимвольної інтерференції сигналів (МІС) залишається однією з актуальних проблем, тому що збільшення швидкості передавання спричиняє спотворення сигналу, який відповідає наступним символам, внаслідок впливу сигналу, який відповідає попереднім символам, що ускладнює прийняття правильного рішення відносно кожного символу. Традиційні засоби боротьби з МІС полягають у використанні різноманітних коректорів. Коректори лінійних спотворень створюються у вигляді аналогових пристроїв, які компенсують недосконалість амплітудо-частотної характеристик каналу зв'язку. Також використовуються цифрові коректори, які безпосередньо оперують з сигналом, як функцією часу [1].

Метою дослідження є розробка технічного рішення для аналізу тестових послідовностей оптичних сигналів з урахуванням дисперсійних спотворень та дії випадкових шумів, пошук принципів втілення запропонованого методу на базі роздільності сумішей [2].

Завдання: розробити структурну схему регенератора оптичних сигналів, визначити вимоги щодо часових параметрів аналогово-цифрових перетворювачів, створення програми для проведення імітаційного моделювання формування вхідної тестової послідовності інформаційних сигналів та шумів, вихідних відкликів, визначення методів адаптації пристроїв розпізнавання образів дискретних сигналів, що передаються, аналіз особливостей використання цих методів у ВОЛЗ. Використовуваними методами є: математичні методи розв'язання задач математичної статистики та статистичній теорії сумішей, методи ймовірнісного обчислення, комп'ютерне моделювання у пакеті математичної обробки.

Принципи побудови коректорів не ураховують стохастичного характеру сигналу [2], який виявляється у вигляді додаткових спотворень сигналу випадковими шумами та випадкового характеру послідовності переданих сигналів. Нейтралізація МІС за допомогою коректорів стає неспроможною, коли інтерференція створюється штучно з використання сигналів з частковим відгуком.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення проблем МІС запропоновано принципово інший підхід, оснований на статистичній теорії сумішей яка була розроблена Тейчером та знайшла плідне використання при вирішенні задач розпізнавання образів в умовах значної апріорної невизначеності [3]. Методи статистичного поділу сигналів, на відміну від детермінованих, ґрунтуються переважно на інформації про характеристики джерел сигналів [4]. У [5] наочно підтверджено доцільність її використання також для вирішення проблем МІС. У [7] розглянуто шляхи підвищення швидкості передачі сигналів, причини та методи боротьби з міжканальними та міжсимвольними спотвореннями, зумовленими перевідбиттям сигналу і обмеженою величиною розв'язки між каналами. Оптимізована схема побудови фото приймального модуля для каналних трактів магістральних ВОЛЗ пропонується у роботі [8]. Отримані позитивні результати стали підставою для поглибленого дослідження шляхів впровадження понять та методів статистичної теорії сумішей для вирішення задач, пов'язаних з МІС.

2. Розробка пристрою для боротьби з МІС

Загальна структурна схема регенератора оптичних сигналів з цифровою обробкою що використовує алгоритми на основі теорії сумішей показана на рис. 1.

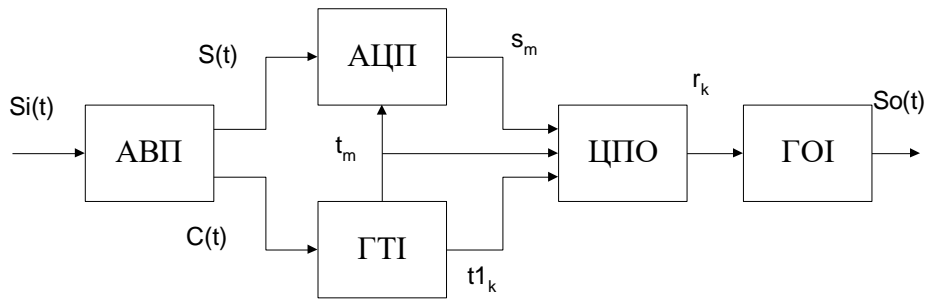


Рис. 1. Структурна схема регенератора оптичних сигналів

Схема регенератора складається з таких елементів. АВП - аналогові вхідні пристрої, які здійснюють приймання оптичних сигналів $S_i(t)$, їх детектування та фільтрацію. Прийняті оптичні сигнали $S_i(t)$ перетворюються за допомогою оптоволоконного конвертера (OE converter) [7], на виході якого формується електричний сигнал $S(t)$, який містить інформацію про послідовність переданих символів “0” та “1”, а також сигнал синхронізації $C(t)$. ГТІ - генератор тактових імпульсів, який з сигналу $C(t)$ формує тактові послідовності t_{1k} (один імпульс на кожний бітовий інтервал) та t_m (n_b імпульсів на протязі бітового інтервалу). АЦП - аналого-цифровий перетворювач, який здійснює кодування відліків $s_m = S(t_m)$ у вигляді n_r -розрядного двійкового коду. ЦПО - цифровий пристрій обробки, який реалізує операції адаптації та демодуляції, видає у режимі демодуляції рішення $r_k = 1$ або $r_k = 0$ для кожного k -го бітового інтервалу. ГОІ - генератор оптичних імпульсів, який у відповідності з рішенням r_k формує відновлені оптичні імпульси $S_o(t)$ на виході регенератора.

Незалежно від технічної реалізації ЦПО важливо визначити часову дискретність відліків сигналу $S(t)$, тобто число відліків n_b на протязі бітового інтервалу та дискретність відліків амплітуди s_m , тобто число n_r розрядів кодування. Перший параметр повинен задовольняти нерівності $n_b \geq 2$. Проте збільшення n_b спричиняє необхідність збільшення швидкодії АЦП та ЦПО, що ускладнює регенератор. Крім того, збільшення n_b виправдано лише тоді, коли зберігається незалежність випадкових спотворень сигналу $S(t)$ шумами $N(t)$ для кожного відліку. Якщо АВП здійснює погоджену фільтрацію сигналу $S(t)$, то випадкові складові відліків виявляються корельованими тим значніше, чим більше n_b . Ураховуючи ці особливості, доцільно прийняти $n_b=2$.

Збільшення числа розрядів кодування n_r ускладнює АЦП та ЦПО, якщо алгоритм демодуляції має апаратну реалізацію. Внаслідок малорозрядного кодування формуються досить грубі “образи” сигналу на етапі адаптації і це знижує достовірність демодуляції. Якщо при збільшенні числа розрядів дискретність кодування зменшується до значень, менших середньоквадратичного значення шумів σ_n , то подальше збільшення n_r стає даремним. Таким чином, визначення мінімального числа розрядів кодування, при якому забезпечується прийнятна достовірність демодуляції, є однією з важливих задач технічної реалізації запропонованого алгоритму обробки.

Дискретизація амплітуди сигналів в АЦП може бути описана наступною функцією:

$$\text{kvant}(x) = \begin{cases} \frac{Nr-1}{Nr}, & \text{якщо } x > \frac{Nr-1}{Nr} \\ \frac{[x \cdot Nr]}{Nr}, & \text{якщо } 0 \leq x \leq \frac{Nr-1}{Nr} \\ 0, & \text{якщо } x < 0 \end{cases}$$

де $[n]$ - ціла частина числа n ; $Nr = 2^{n_r}$ - число рівнів квантування. Робоче значення аргументу x знаходиться у діапазоні $0 \leq x \leq 1$.

При обробці цифрових значень відліків потрібне число розрядів повинно перевищувати n_r на декілька одиниць. Якщо ЦПО створюється на базі мікропроцесорів, то ця вимога виконується, оскільки сучасні сигнальні процесори мають не менше, ніж 32 розрядів. Для перевірки впливу числа розрядів кодування n_r виконане статистичне моделювання.

Дискретизація значень відліків урахована у вигляді заміни s_m на $\text{kvant}(s_m)$ при обчисленні масиву накопичених значень відліків s_m для адаптації регенератора, що виконується за формулою [10]:

$$sm_m = \frac{1}{Nw} \sum_{j=0}^{Nw-1} s_{6j+m}, \quad m = 0, \dots, 5. \quad (1)$$

Також $\text{kvant}(s_m)$ використовується при обчисленні оцінки імовірності $p_2(k)$ того, що на k -й позиції знаходиться символ "1" при демодуляції сигналів:

$$p_2(k) = \sum_{m=1}^M c_{1,2,m} \cdot s_{k \cdot n_b + m - 1}. \quad (2)$$

Усі інші обчислення виконані з максимальною точністю, можливою у системі MathCAD14.

Для адаптації регенератора використовувалася послідовність повторюваних трійок символів "010" (ТПС1), яка складалася з $Nw=257$ трійок символів "010" [9, 10]. У кожному сеансі моделювання демодуляції формувалася вибірка сигналів на протязі 256 бітових інтервалів. Для набору статистики помилок демодуляції сеанси моделювання повторювалися 400 або 4000 разів. Таким чином, загальне число символів, які моделювалися у кожній групі сеансів, досягало 100000 або 1000000. Результати моделювання показані у табл. 1.

Таблиця 1 - Результати моделювання

σ_n	С / Ш	$n_r = 2$	$n_r = 3$	$n_r = 4$	$n_r = 6$	$n_r = 10$	$n_r = 15\text{др}$
0.2	14	0.0043	0.0030	0.0028	0.0030	0.0030	0.0035
0.18	14.9	0.0019	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0015
0.16	15.9	0.00062	0.00034	0.00024	0.00024	0.00025	0.00041
0.141	17	0.00015	0.00008	0.00002	0.00004	0.00004	0.00008
0.12	18.4	0.00003	0.000005	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001

У першій колонці подана інтенсивність шумів у вигляді значення σ_n . У другій колонці - відношення сигнал/шум у дБ, обчислене як $20 \cdot \lg(1/\sigma_n)$ з урахуванням того, що максимальна амплітуда корисного сигналу $S(t)$ приблизно дорівнює 1. У інших колонках наведені оцінки імовірності помилок демодуляції для різного числа n_r розрядів кодування у АЦП.

Як бачимо, при малому числі розрядів $n_r = 2$ помилки, як і слід було очікувати, максимальні. Проте вже при $n_r = 4$ вони досягають мінімуму. Подальше збільшення числа розрядів кодування фактично не поліпшує достовірність демодуляції, а навпаки, погіршує її. Наприклад для максимально можливої точності обчислень у системі MathCAD14, яка відповідає 15 десятковим розрядам ($n_r = 15\text{др}$), результати навіть гірші, ніж при $n_r = 4$. Це можна пояснити тим, що квантування, з одного боку, робить "образ" сигналу більш грубим, але, з іншого боку, у деякій мірі нівелює вплив шумів у інтервалі значень ΔS між рівнями квантування. Якщо $\Delta S \ll \sigma_n$, то нівелювання не відбувається. Разом з тим очевидно, що при зменшенні рівня шумів доцільно зменшувати ΔS , тобто збільшувати n_r . Ураховуючи, що рівень шумів при моделюванні перевищує реальний рівень шумів у регенераторах (оскільки неможливо отримати статистично достовірні оцінки імовірностей помилок при малих шумах), можна вважати достатнім 5 розрядів кодування у АЦП.

3. Технічна реалізація пристрою усунення МІС

Операції цифрової обробки пов'язані з адаптацією регенератора і демодуляцією сигналів, можуть бути виконані за допомогою сучасних сигнальних процесорів. Такий

мікропроцесорний варіант реалізації ЦПО є технічно найбільш простим та дешевим. Проте у цьому випадку можливе тільки послідовне виконання операцій, що значно обмежує реальну швидкість ЦПО. Разом з тим, найбільш критичними з точки зору швидкодії є дві групи операцій, пов'язаних безпосередньо з обробкою відліків сигналу s_m . Це операції накопичування сум (1) на етапі адаптації та операції обчислення оцінки імовірності $p_2(k)$ (2). На етапі демодуляції висока швидкість потрібна при операції з прийняття рішення r_k де потрібно порівняти отриману оцінку з порогом прийняття рішення p_{por} за виразом:

$$r_k = \begin{cases} 1 & \text{якщо } p_2(k) > p_{por}, \\ 0 & \text{у протилежному разі.} \end{cases} \quad (3)$$

На підставі достатньої простоти вказаних операцій доцільно створити спеціалізовані вузли для їх виконання, які забезпечують мінімальний час обробки, зокрема завдяки організації паралельних обчислень. Можна рекомендувати такий принцип та черговість обробки.

По-перше, треба формувати досить довгу тестову послідовність ТПС1 для адаптації регенератора. Причому тільки початковий фрагмент довжиною $3 \cdot N_w$ символів фактично використовується для отримання інформації щодо властивостей сигналів. На цьому фрагменті треба сформувати часткові суми (для кожного $m = 0, \dots, 5$) у виразі (1). Відповідні операції повинні виконуватися у реальному часі вузлом накопичування (ВН).

Після початкового фрагмента послідовність ТПС1 повинна продовжуватися на протязі часу, який перевищує час, потрібний мікропроцесорному обчислювачу (МПО) для виконання усіх наступних операцій, включаючи обчислення коефіцієнтів $c_{12,1}, \dots, c_{12,4}$, які використовуються у виразі (2). На протязі цього часу, який можна назвати "виконанням адаптації" (ВА), вхідні сигнали регенератора ігноруються. Для визначення тривалості інтервалу ВА потрібне макетування МПО.

Після закінчення інтервалу ВА регенератор переходить у робочий режим обробки сигналів у відповідності з виразами (1), (2). Ця обробка виконується окремим вузлом демодуляції (ВД). Можливий варіант структурної схеми такого апаратно-програмного ЦПО відображено на рис. 2.

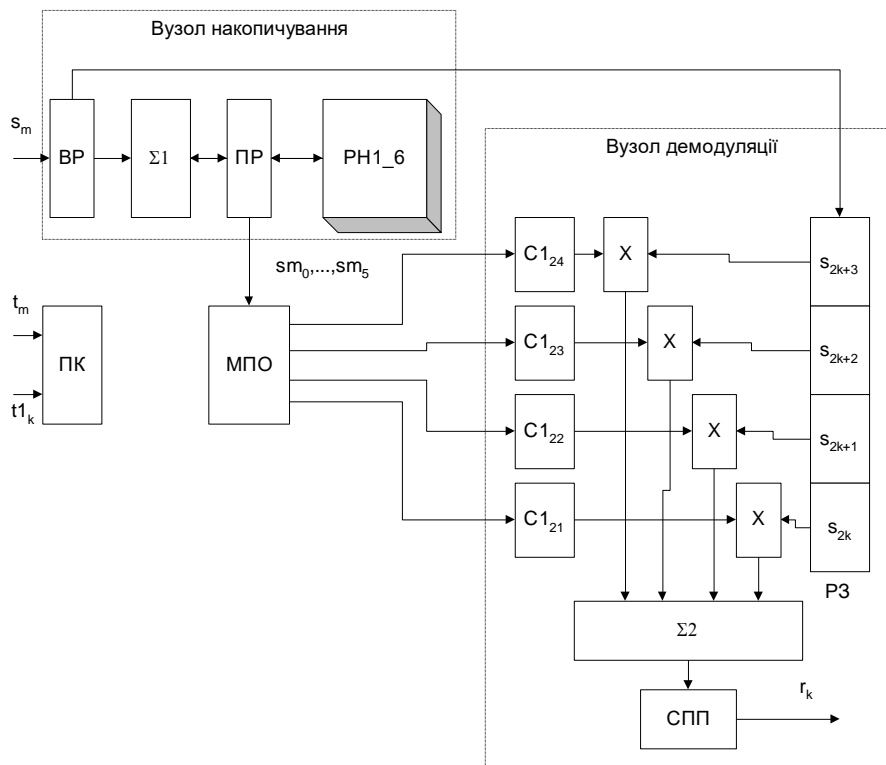


Рис. 2. Структурна схема цифрового пристрою обробки

Згідно з результатами імітаційного моделювання, приймімо число розрядів кодування АЦП $n_r = 5$, а довжину початкового фрагмента ТПС1 виберемо 768 символів, тобто $N_w = 256$.

Вузол накопичування (ВН) складається з таких елементів:

ВР - вхідний 5-розрядний регістр, до якого надходять відліки s_m з АЦП;

РН1,...,РН6 - 13-розрядні регістри накопичування часткових сум (1). Число розрядів визначається як $5 + \log_2(N_w) = 5 + 8 = 13$;

ПР - 13-розрядний проміжний регістр, за допомогою якого здійснюється зв'язок з РН1,...,РН6 та МПО;

$\Sigma 1$ - 13-розрядний суматор, який здійснює додаток чергового відліку до відповідної часткової суми.

Отримані суми після завершення накопичення передаються за допомогою ПР у мікропроцесорний обчислювач. Числа, з якими оперує даний вузол, розглядаються як цілі невід'ємні числа (з точкою, фіксованою після молодшого розряду). Результатом обчислень операцій, які виконує мікропроцесорний обчислювач (МПО), є коефіцієнти $c_{12,1}, \dots, c_{12,4}$, що записуються у відповідні регістри $C_{12,1}, \dots, C_{12,4}$ вузла демодуляції (як 16-розрядні числа з фіксованою або плаваючою точкою).

Вузол демодуляції (ВД) складається з наступних елементів:

$C_{12,1}, \dots, C_{12,4}$ - регістри з ваговими коефіцієнтами, які визначені на етапі адаптації регенератора;

РЗ - регістр зсуву з 4 комірок по 5 розрядів, куди у робочому режимі надходять відліки s_m (кожний тактовий імпульс t_m зсуває інформацію на одну комірку);

Х - 16-розрядні помножувачі, які забезпечують обчислення кожного доданка суми (2.2), причому значення s_m обробляються як дробові числа з точкою, фіксованою перед старшим розрядом;

$\Sigma 2$ - 16-розрядний суматор, який накопичує суму (2.2);

СПП - схема порівняння з порогом $p_{por} = 0.5$, яка видає рішення r_k у відповідності з (2.3). Неважко показати, що рішенням є значення розряду, який знаходиться праворуч від точки, що розділює цілу та дробову частину числа на виході суматора.

Операції множення та підсумовування у вузлі демодуляції виконуються один раз на протязі бітового інтервалу, тобто по тактовому імпульсу t_{1k} .

Крім розглянутих пристроїв у складі ЦПО є також пристрій керування (ПК), який синхронізує взаємодію інших пристроїв за допомогою тактових імпульсів t_m, t_{1k} .

Відповідно до логічної послідовності обробки сигналів у ЦПО мікропроцесорний обчислювач починає роботу після того, як завершує роботу вузол накопичування. Проте потрібно урахувати, що МПО та ВН починають функціонувати одночасно після включення живлення або надходження спеціального сигналу початку роботи. Поки ВН здійснює накопичування ТПС1, доцільно передбачити тестування МПО. Оскільки співвідношення часу накопичування та часу тестування невідоме, то будемо виходити з такого принципу взаємодії:

- ВН після завершення своєї роботи передає до МПО накопичені суми sm_1, \dots, sm_6 та ознаку готовності, які записуються у пам'ять МПО у режимі переривання;

- МПО після завершення тестування перевіряє ознаку готовності і у разі її наявності переходить до обробки інформації, а у разі відсутності очікує появу ознаки готовності.

Після закінчення усієї обробки, пов'язаної з адаптацією регенератора, МПО видає у вузол демодуляції отримані вагові коефіцієнти $c_{12,1}, \dots, c_{12,4}$ та видає у пристрій керування ознаку закінчення адаптації, по якій останній відкриває надходження відліків сигналу s_m до регістра зсуву РЗ у ВД та через 2 бітових інтервалів (коли регістр заповниться) дозволяє роботу схеми порівняння з порогом, яка видає рішення r_k .

У ВН 5-розрядні відліки сигналу s_m інтерпретуються як цілі числа та накопичуються у регістрах накопичування (РН1,...,РН6) також як цілі 13-розрядні числа. У МПО вони спочатку обробляються як цілі 16-розрядні числа, у яких зайнято 13 молодших розрядів (word), а потім інтерпретуються як дробові числа з точкою, фіксованою перед 13-м розрядом.

Усі подальші операції припускається виконувати у 16-розрядному форматі з плаваючою точкою (float), де 11-12 розрядів (включаючи знаковий) достатньо виділити для мантиси і 5-4 розрядів для порядку. Формат чисел типу float потребує уточнення згідно з особливостями того чи іншого сигнального процесора. Уточненню підлягає формат результатів обробки (вагових коефіцієнтів), який потрібно узгодити з елементною базою ВД.

4. Висновки

1. Метод демодуляції сигналів у ВОЛЗ, який запропоновано, зводиться до обчислення у зваженої суми 4 відліків вхідного сигналу і порівняння отриманої суми з порогом.

2. Для забезпечення мінімуму помилок демодуляції вагові коефіцієнти при підсумовуванні відліків повинні враховувати фактичні дисперсійні спотворення у кожній конкретній ВОЛЗ та фактичний зсув моментів відліків від своїх номінальних положень на осі часу внаслідок запізнювання у схемі синхронізації. Таким чином, потрібна попередня адаптація регенератора до конкретних умов функціонування.

3. Адаптація регенератора можлива за допомогою спеціальної тестової послідовності символів (ТПС), яка складається з повторюваної трійки символів "010" та повинна надходити з пункту передавання на протязі деякого часу адаптації перед передаванням інформаційної послідовності.

4. Під час адаптації регенератора потрібно накопичити 6 усереднених відліків реального сигналу, які відповідають трьом бітовим інтервалам (2 відліку на протязі бітового інтервалу). Потім здійснити центрування та виділити 4 з 6 усереднених відліків. Виділені відліки утворюють "образ" реального сигналу у вигляді реакції ВОЛЗ на поодинокий символ "1", яка внаслідок дисперсійних спотворень займає приблизно 2 бітових інтервалів. На останнє - обчислити значення вагових коефіцієнтів для отриманого "образу" реального сигналу.

Список використаної літератури

1. Стеклов В.К. Теория электрической связи / Стеклов В.К., Беркман Л.Н.; Под ред. В.К. Стеклова – Київ: Техніка, 2006. – 552 с.:іл.
2. Миленький А.В. Классификация сигналов в условиях неопределенности /Миленький А.В. - М: Советское радио, 1975. – 328 с.
3. Teicher H. Identifiability of finite mixtures// Ann. Math. Stat. –V.34. – N 4. – 1963. – P.126-129.
4. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд.: Пер. с англ./ Скляр Бернанд. – М: "Вильямс", 2003. – 1104 с.
5. Засов В.А. Алгоритмы и вычислительные устройства разделения и восстановления сигналов в многомерных динамических системах/ Засов В.А. //Сам: СамГУПС, 2012. – 233 с.
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов/Сергиенко А.Б. – СПб: "Питер", 2003. – 604 с.
7. Сундучков А.К. Скорость передачи, межканальные и межсимвольные искажения / Сундучков А.К., Фадеева Е.А., Яцук А.В., Сундучков К.С. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua>
8. Лукин И. Оптимизация фотоприемного модуля для магистральных волоконно-оптических линий связи./И. Лукин, В. Удовиченко, С. Лебедев// Компоненты и технологии. – 2011. – №1. – С. 92-97.
9. Ярцев В.П. Технічна реалізація цифрової обробки адаптації регенератора для боротьби з міжсимвольною інтерференцією сигналів /Ярцев В.П. //12 Міжнар. наук.-техн. конф."Проблеми інформатизації". Тези доповідей. 12-13 грудня 2018р., Київ, Україна. К.: ДУТ. – 2018. – С. 68.
10. Ярцев В.П. Використання статистичної теорії сумішей для боротьби з міжсимвольною інтерференцією сигналів у ВОЛЗ/ В.П. Ярцев, О.Ю. Котомчак, В.А. Сабадаш // Зв'язок. – №3. – 2018. – С. 71-80.

References

1. Steklov V.K., Berkman L.N. *Theory of electrical communication*. Technics, Kiyv, 2006.
2. Milenky A.V. *Classification of signals in conditions of uncertainty*. Soviet Radio, 1975.
3. Teicher H. Identifiability of finite mixtures, "Ann. Math. Stat" (1963), Vol. 34, No. 4, 126-129.
4. Sklyar Bernard. *Digital communication. Theoretical basis and practical application. 2nd ed*, "Williams", 2003.
5. Zasov V.A. *Algorithms and computing devices for separating and reconstructing signals in multidimensional dynamic systems*, SamGUPS, Samara, 2012.
6. Sergienko A.B. *Digital signal processing*, Piter, St. Petersburg: 2003.
7. Chests A.K. Sounduchkov A.K., Fadeeva E.A., Yatsuk A.V., Sounduchkov K.S. "Transmission rate, interchannel and intersymbol distortions", 28 March 2019, <http://ena.lp.edu.ua>.
8. Lukin I., Udovichenko V., Lebedev S. Optimization of the photodetector module for the main fiber-optic communication lines, *Components and Technologies 1* (2011), 92-97.
9. Yartsev V.P. Technical implementation of digital processing of adaptator regenerator for fighting with a mimicry signal interference, *12 International Scientific Conference "Problems of Informatization", Ukraine, Kiev, SUT, 12-13 December (2018)*, 68.
10. Yartsev V.P. Kotomchak O.Yu., Sabadash. V.A. Using statistical theory of mixtures to combat inter-symbol interference of signals in the FOCL, *Zv'yazok 3* (2018), 71-80.

Автори статті (Authors of the article)

Ярцев Володимир Петрович – к.т.н., доцент кафедри Системного аналізу (Yartsev Volodymyr Petrovych – PhD in Technics, Associate Professor of Systems Analysis Department). Phone: +380 50 161 2312. E-mail: jvp57@ukr.net.

Гололобов Дмитро Олександрович – к.ф.-м.н., доцент кафедри Системного аналізу (Gololobov Dmitry Alexandrovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Systems Analysis Department). Phone: + 380 44 249 2567. E-mail: dut.gololobov.dma@meta.ua.

Котомчак Олександр Юрійович – старший викладач кафедри Системного аналізу (Kotomchak Oleksandr Yuriiovych – Senior Lecturer of Systems Analysis Department). Phone: + 380 44 249 2567. E-mail: katoa@ukr.net.

Сударєва Ольга Валеріївна – асистент кафедри Системного аналізу (Sudareva Olha Valeriyvna – Professor Assistant of Systems Analysis Department). Phone: + 380 44 249 2567. E-mail: osudareva@gmail.com.

Сеньков Олег Вікторович – асистент кафедри Інформаційних систем та технологій (Senkov Oleh Viktorovych – Professor Assistant of Department of Information systems and technologies). Phone:+ 380 67 537 02 08. E-mail: ovsenkov82@gmail.com.

Дата надходження
в редакцію: 01.04.2019 р.

Рецензент:
к.т.н., доцент Като В.Б.
ПАТ «Укртелеком», Київ