

УДК 621.376.6

МОДИФІКАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ДЕМОДУЛЯЦІЇ КАМ ЗІ ЗМІННИМ ЗНАЧЕННЯМ ЧАСТОТИ-НОСІЯ

А.А. Овчарук
Аспірант*

Контактний тел.: (0432) 43-57-68
E-mail: pendalf2008@inbox.ru

П.О. Гаврасієнко
Аспірант

Кафедра телекомунікаційних систем і телебачення**
Контактний тел.: 097-619-55-09
E-mail: pasha.3pl@mail.ru

С.Т. Барась

Кандидат технічних наук, доцент, декан*
Контактний тел.: (0432) 59-85-38
E-mail: penalf2008@mail.ru

*Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури**

**Вінницький національний технічний університет
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021

С.А. Овчарук

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
пр-т Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
Контактний тел.: 098-065-31-67
E-mail: Scorp_13@i.ua

Модифіковано процедуру демодуляції КАМ-сигналу з використанням частоти-носія сигналу як додаткового інформаційного параметру, що дозволило уніфікувати елементи структурної схеми демодулятора, а також розроблено математичну модель даного КАМ-сигналу

Ключові слова: КАМ, телекомунікації, частота-носії, модуляція

Модифицирована процедура демодуляции КАМ-сигнала с использованием несущей частоты сигнала как дополнительного информационного параметра, что позволило унифицировать элементы структурной схемы демодулятора, а также разработана математическая модель данного КАМ-сигнала

Ключевые слова: КАМ, телекоммуникации, несущая частота, модуляция

The procedure of demodulation of QAM-signal with using carrier frequency as an additional information parameter has been modified. It allowed unify elements of the block diagram of a demodulator. The mathematical model as QAM-signal have been developed

Keywords: QAM, telecommunications, carrier frequency, modulation

1. Вступ

Традиційним підходом для підвищення швидкості передачі інформації на основі квадратурної амплітудної модуляції (КАМ) є збільшення кількості рівнів амплітуди і початкової фази сигналу [1]. У роботі [2] було запропоновано альтернативний метод підвищення швидкості передачі інформації на основі КАМ, який базується на використанні частоти-носія як додаткового інформаційного параметру. Використання даного методу дозволило досягти кращого значення завадостійкості КАМ-сигналу. Але при цьому відбулося значне ускладнення структурної схеми приймача КАМ-сигналу, як у плані збільшення кількості структурних елементів так і у плані схемотехнічної реалізації цих елементів. При використанні значної кількості значень частоти-носія структурна схема приймача [2] сигналу КАМ з використанням частоти-носія як додаткового інформаційного параметру (КАМЗЧ) стає нетехнологічною, через необхідність використання великої кількості смугових фільтрів з різними смугами пропускання і великою крутизною фронтів.

2. Постановка завдання

Метою даного дослідження є модифікація процедури демодуляції КАМ-сигналу з використанням значення частоти-носія сигналу як додаткового інформаційного параметру, шляхом уніфікації елементів структурної схеми приймача такого КАМ-сигналу, а також розробка його математичної моделі.

3. Методика проведення досліджень

Звичайний КАМ-сигнал можна представити формулою [1, 3]:

$$Z_m(t) = I_m \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q_m \cdot \sin(2\pi f_c t), \tag{1}$$

де I_m , Q_m – синфазний і квадратурний модулюючі імпульси;
 f_c – частота-носії;
 t – час, змінюється в діапазоні $\{(m-1) \cdot T_{им} \dots m \cdot T_{им}\}$;

$m=1,2,\dots,N_{\text{ім}}$ – порядковий номер модулюючого імпульсу;

$T_{\text{ім}}$ – період модулюючого сигналу;

$N_{\text{ім}}$ – кількість модулюючих імпульсів.

У [2] описано метод КАМЗЧ. Там же наведено зміни у структурних схемах передавача і приймача. При цьому у приймачі передбачається значне ускладнення схеми, основною причиною якого є введення смугових фільтрів границь ФГ [2], що призначені для порівняння рівня (потужності чи енергії) сигналу в підканалах. Верхня і нижня границя k -того фільтра $\Phi\Gamma_k$ визначаються за формулою:

$$\Phi\Gamma_k : \begin{cases} f_k^- = f_{\text{ck}} - f_m; \\ f_k^+ = f_{\text{ck}} + f_m, \end{cases} \quad (2)$$

де

$k=1,2,\dots,N_c$;

f_m – частота модулюючого сигналу;

N_c – кількість рівнів частоти-носія:

$$N_c = 2^{N_{\text{дод}}},$$

де $N_{\text{дод}}$ – кількість додаткових біт, що передаються під час одного модулюючого імпульсу у змінах значення частоти-носія.

Таким чином для передачі $N_{\text{дод}}$ додаткових біт необхідно використати N_c смугових фільтрів границь. При значенні $N_{\text{дод}} = 1$ це не викликає особливих проблем.

Але з ростом $N_{\text{дод}}$ структурна схема приймача [2] стає нетехнологічною, через те що смуги пропускання ФГ є різними і їх розробка потребує досить значних затрат, а виготовлення – часу.

Для розуміння необхідності демодуляції кожного імпульсу КАМЗЧ правильним значенням опорної частоти $f_{\text{он}}$, необхідно розглянути як впливає значення $f_{\text{он}}$ на демодульований сигнал, а саме на положення першої пелюстки спектру демодульованого сигналу на частотній осі. Промодульований КАМ-сигнал для однієї гармоніки Ω , що лежить у межах $(0; f_m)$, і постійної складової A_0 матиме вигляд (відповідно до (1) та вважаючи що амплітуда гармоніки Ω рівна одиниці) [4]:

$$\begin{aligned} Z(t) &= (A_0 + \cos(\Omega t))\cos(\omega_c t) + (A_0 + \cos(\Omega t))\sin(\omega_c t) = \\ &= A_0 \cos(\omega_c t) + A_0 \sin(\omega_c t) + \frac{M}{2} \cos((\Omega + \omega_c)t) + \\ &+ \frac{M}{2} \sin((\Omega + \omega_c)t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c - \Omega)t) + \frac{M}{2} \sin((\omega_c - \Omega)t). \end{aligned} \quad (3)$$

де M – глибина модуляції.

Припустимо $f_{\text{он}} = f_c$, тоді демодульований сигнал пропущений через ФНЧ у синфазному каналі матиме вигляд:

$$y_1(t) = \Phi\text{НЧ}(Z(t) \cdot \cos(\omega_c t)) = \frac{A_0}{2} + \frac{M}{2} \cdot \cos(\Omega t). \quad (4)$$

Якщо припустити, що у межах $(0; f_m)$ існує неперервний спектр сигналу (рис. 1а), то формулу (4) можна поширити на кожен складову цього спектру.

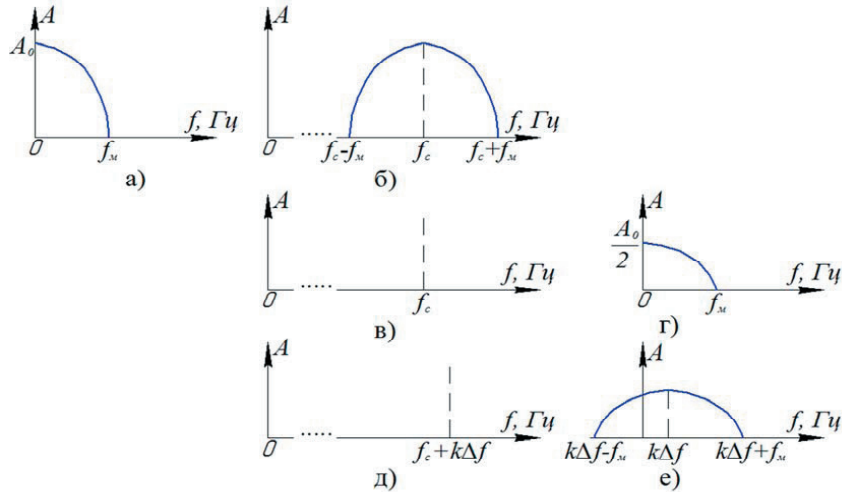


Рис. 1. Залежність спектру демодульованого сигналу від зміни значення опорної частоти демодулятора

На рис 1б подано спектр модульованого сигналу (формула 1). На рис. 1в наведена гармоніка опорного коливання $f_{\text{он}} = f_c$, а на рис. 1г – спектр сигналу демодульованого за допомогою цієї гармоніки. Даний сигнал відповідає за розміщенням спектральних складових модулюючому сигналу (рис. 1а).

Тепер припустимо $f_{\text{он}} = k \cdot \Delta f + f_c$ (рис. 1д), тоді демодульований сигнал пропущений через ФНЧ у синфазному каналі матиме вигляд:

$$\begin{aligned} y_1'(t) &= \Phi\text{НЧ}(Z(t) \cdot \cos((k\Delta\omega + \omega_c)t)) = \\ &= \frac{A_0}{2} \cdot (\cos(k\Delta\omega t) + \sin(k\Delta\omega t)) + \\ &+ \frac{M}{4} \cdot (\cos((k\Delta\omega - \Omega)t) + \sin((k\Delta\omega - \Omega)t)) + \\ &+ \frac{M}{4} \cdot (\cos((k\Delta\omega + \Omega)t) + \sin((k\Delta\omega + \Omega)t)). \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином, внаслідок нерівності частоти-носія і опорної частоти НЧ складові демодульованого сигналу виявляються амплітудно-модульованими з центральною частотою рівною $k\Delta f$ (рис. 1е). При цьому постійна складова сигналу переноситься саме на цю частоту. Частина спектру, яка виявляється на від'ємній частині осі частот відбивається дзеркально відносно осі ординат, а тому спектр такого сигналу буде складним і неоднозначним. Але аналізуючи формули (4) і (5) можна зробити припущення про те що енергетика сигналу демодульованого правильною опорною частотою (рис. 1г) на проміжку частот $(0; k\Delta f)$ буде вищою за енергетику сигналу демодульованого зміщеною опорною частотою (рис. 1е). Так, якщо пропустити сигнали (4) і (5) через ФНЧ з частотою зрізу $f_{\text{зр}} < k\Delta f$, то вони приймуть відповідно вигляд:

$$y_1(t) = \frac{A_0}{2} + \frac{M}{2} \cdot \cos(\Omega t), \quad 0 < \Omega < \omega_{\text{зр}}; \quad (6)$$

$$y_1'(t) = \frac{M}{4} \cdot (\cos((k\Delta\omega - \Omega)t) + \sin((k\Delta\omega - \Omega)t)), \quad (7)$$

$$k\Delta\omega - \omega_{сп} < \Omega < \omega_m.$$

Енергія сигналу визначається за формулою [5]:

$$E = \int_0^T y_1^2(t) dt, \quad (8)$$

де T - інтервал протягом якого відбувається рес-страція сигналу.

Якщо прийняти, що спектр сигналу складається з однієї гармоніки $k\Delta\omega - \omega_{сп} < \Omega < \omega_{сп}$ та постійної складової A_0 , то енергії сигналів (6) і (7) матимуть вигляд:

$$E = \int_0^T \left(\frac{A_0}{2} + \frac{M}{2} \cdot \cos(\Omega t) \right) dt = \frac{A_0^2}{4} T + \frac{M^2}{8} T + \frac{A_0 M}{2\Omega} \sin(\Omega T) + \frac{M^2}{16\Omega} \sin(2\Omega T); \quad (9)$$

$$E' = \frac{M}{4} \int_0^T (\cos((k\Delta\omega - \Omega)t) + \sin((k\Delta\omega - \Omega)t)) dt = \frac{2M^2 (\cos(2(\Omega - k\Delta\omega)T) - 1)}{64(\Omega - k\Delta\omega)} + \frac{M^2 T}{16}. \quad (10)$$

Значення енергії (9) буде мінімальним, якщо $\Omega T = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$ або $T = 0, 1, 2, 3, \dots$.

В такому випадку поділивши (9) на (10) визначимо в скільки разів енергія сигналу (6) буде більшою за енергію сигналу (7) для однієї гармоніки Ω та постійної складової A_0 у випадку мінімального значення енергії (9):

$$\frac{E}{E'} = \frac{32T(\Omega - k\Delta\omega) \left(\frac{A_0^2}{4} + \frac{M^2}{16} \right)}{M^2 (\cos(2(\Omega - k\Delta\omega)T) - 1 + 2T(\Omega - k\Delta\omega))}. \quad (11)$$

Складовою $\cos(2(\Omega - k\Delta\omega)T) - 1$ при $\Omega - k\Delta\omega \gg 1$ можна знехтувати. Тоді співвідношення (11) перетворюється у:

$$\frac{E}{E'} = \frac{4A_0^2}{M^2} + 1 > 1. \quad (12)$$

Отже, згідно (11), енергія сигналу (6) буде більшою за енергію сигналу (7). А тому якщо порівнювати ці енергії між собою можна зробити висновок про те, яка саме опорна частота є правильною для демодуляції даного символу КАМЗЧ. На основі цього факту була запропонована структурна схема демодулятора зображена на рис. 2.

Демодуляція сигналу проводиться одночасно на N_c квадратурних або амплітудних демодуляторах Д1, Д2, ... Д N_c з різними значеннями опорної частоти, які створюються генератором сітки частот ГСЧ.

Фільтри нижніх частот ФНЧ налаштовані на частоту зрізу $f_{сп}$, яка визначається виходячи з кроку частоти Δf :

$$f_{сп} < \Delta f. \quad (13)$$

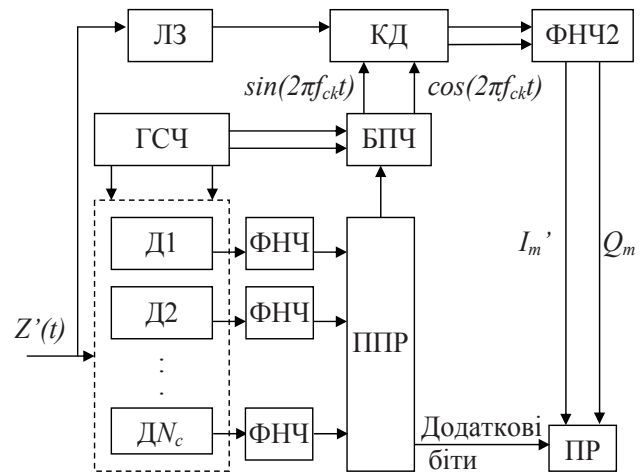


Рис. 2. Модифікована структурна схема демодулятора сигналу КАМЗЧ

Пристрій прийняття рішень ППР забезпечує порівняння енергії сигналу виділеного фільтрами ФНЧ. Той фільтр, енергія на виході якого енергія найвища відповідає демодулятору Д на який подається правильне значення частоти-носія з генератора ГСЧ. ППР виділяє додатковий біт інформації який передавався у даному модулюючому імпульсі і встановлює правильне значення опорної частоти $f_{он}$ на виході блоку перемикання частот БПЧ. Це забезпечує правильну демодуляцію поточного імпульсу у квадратурному демодуляторі КД.

Лінія затримки ЛЗ забезпечує затримку сигналу на час прийняття рішення ППР.

Фільтр нижніх частот ФНЧ2 забезпечує виділення демодульованих сигналів I_m' та Q_m' у смузї (0; f_m), які разом з додатковими бітами надходять на приймач ПР.

Математична модель, яка описує модуляцію [2] і демодуляцію (рис. 2) сигналу КАМЗЧ з двома частотами-носіями матиме вигляд:

1) передавач:

- задаємо множину значень модулюючих імпульсів I_m та Q_m , а також множину значень додаткових бітів d_m ;
- задаємо значення кроку зміни частоти Δf і значення основної частоти-носія f_{c1} ;
- проводимо процес модуляції:

$$\left. \begin{aligned} Z_m(t) &= I_m \cdot \cos(2\pi f_c(t)t) + Q_m \cdot \sin(2\pi f_c(t)t); \\ \gamma(d) &= \begin{cases} f_{c1}, & d = 0; \\ f_{c1} + \Delta f, & d = 1; \end{cases} \\ f_c(t) &= \gamma(d_m); \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2) приймаюча частина:

- обираємо частоти зрізу ФНЧ (рис. 2) виходячи з співвідношення (13).

• проводимо попередню демодуляцію сигналу $Z_m(t)$ і отримуємо сигнали $z_{1m}(t)$, $z_{2m}(t)$ на виході ФНЧ (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} z_{1m}(t) &= \text{ФНЧ}(Z_m(t) \cdot \cos(2\pi f_{c1}t)); \\ z_{2m}(t) &= \text{ФНЧ}(Z_m(t) \cdot \cos(2\pi f_{c2}t)); \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

• визначаємо потужності (чи енергію) сигналів $z_{1m}(t)$, $z_{2m}(t)$:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P(z_{1m}(t)); \\ P_2 &= P(z_{2m}(t)); \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

де $P(z_{1m}(t))$ – функція знаходження потужності від сигналу.

• визначаємо значення додаткових бітів, що передавалася в даному імпульсі та встановлюємо правильне значення частоти опорного генератора:

$$\left. \begin{aligned} d'_m &= \begin{cases} 0, & P_1 > P_2; \\ 1, & P_1 \leq P_2; \end{cases} \\ f'_c(t) &= \gamma(d'_m); \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

• проводимо демодуляцію сигналу та визначаємо значення демодульованих імпульсів:

$$\left. \begin{aligned} y_I(t) &= Z_m(t) \cdot \cos(2\pi f'_c(t)t); \\ y_Q(t) &= Z_m(t) \cdot \sin(2\pi f'_c(t)t); \\ I'_m &= \text{ФНЧ}2(y_I(t)); \\ Q'_m &= \text{ФНЧ}2(y_Q(t)); \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

5. Висновки

Отже запропонована у [2] структурна схема приймача КАМЗЧ може бути уніфікована шляхом заміни смугових фільтрів границь [2] на амплітудні демодулятори з ФНЧ (рис. 2). Так як структурні елементи Д та ФНЧ на рис. 2 за своєю схемотехнічною реалізацією є однаковими, то можна спростити процес виготовлення приймача КАМЗЧ. Розроблена математична модель сигналу КАМЗЧ дозволяє створювати сигнали КАМ з використанням частоти-носія як додаткового інформаційного параметру з різною кількістю рівнів фази та амплітуди та з двома можливими рівнями частоти-носія. Ця модель може бути модифікована для більшої кількості рівнів частоти-носія.

Література

1. Голуб, В. С. Квадратурные модуляторы и демодуляторы в системах радиосвязи [Текст] / В. С. Голуб // Электроника: НТБ: науч.-техн. жур. – 2003. – № 3. – С. 28 – 32.
2. Овчарук А. А. Квадратурна амплітудна модуляція зі змінним значенням частоти-носія [Текст] / А. А. Овчарук, С. Т. Барась, Т. І. Овчарук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – №4. – С. 47–51.
3. Бакланов, И. Г. Технология ADSL/ADSL2+ теория и практика применения [Текст] / И. Г. Бакланов. – М.: Метротек, 2007. – 384 с.
4. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: издание третье, переработанное и дополненное [Текст] / С. И. Баскаков. – М. : Высшая школа, 2000 – 462 с.