

УДК 621.391.17

Аналіз завадозахищеності когерентної демодуляції синхронних взаємно неортогональних цифрових сигналів з мінімальною частотною маніпуляцією

Рома О. М., Пелешок Є. В., Голь В. Д., Василенко С. В.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

E-mail: pel85@ukr.net

Вступ. При забезпеченні необхідного рівня економічного та оборонного потенціалу держави важливе місце займає проблема завадозахищеності ліній та мереж цифрового радіозв'язку. Виникає необхідність серед множини технічних методів боротьби із завадами вибирати раціональну їх сукупність, що забезпечуватиме виконання сучасних вимог до завадозахищеності цифрових ліній радіозв'язку. Метою дослідження і основним змістом статті є аналіз завадозахищеності когерентної демодуляції корисного цифрового сигналу (ЦС) з мінімальною частотною маніпуляцією (minimum-shift keying – MSK) в умовах впливу потужної структурної завади.

Теоретичні результати. Для вирішення поставленої мети в статті було вирішено ряд часткових завдань, а саме: синтезовано функціональну схему когерентного демодулятора синхронних взаємно неортогональних ЦС з MSK; розроблено імітаційну модель цифрової радіолінії, яка функціонує в умовах впливу потужної MSK-завади, з реалізацією на приймальній стороні функціональної схеми когерентного демодулятора синхронних взаємно неортогональних ЦС з MSK; проведено ряд експериментів для низки відношень сигнал/шум та сигнал/завада в каналі зв'язку; проведено аналіз завадозахищеності когерентного прийому корисного ЦС з MSK в умовах дії синхронної потужної структурної завади.

Висновки. За допомогою середовища комп'ютерного моделювання Matlab R2017b з пакетом розширення Simulink розроблено імітаційну модель когерентного демодулятора розділення синхронних взаємно неортогональних ЦС з MSK. За відсутності MSK-завади даний когерентний демодулятор вироджується у класичний когерентний демодулятор MSK-сигналу. Аналіз завадозахищеності прийому MSK-сигналу в умовах впливу потужної MSK-завади показав, що при перевищенні миттєвої потужності MSK-завади, більше ніж на 7 дБ, над миттєвою потужністю корисного сигналу негативний вплив на завадозахищеність прийому останнього наближається до нуля, а завадозахищеність прийому наближається до потенціальної завадозахищеності когерентного прийому frequency-shift keying-сигналу.

Ключові слова: завадозахищеність; когерентний прийом; неортогональні сигнали; мінімальна частотна маніпуляція; імітаційна модель

DOI: [10.20535/RADAP.2019.79.48-55](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.48-55)

Вступ

При вирішенні задачі забезпечення необхідного рівня економічного та оборонного потенціалу держави важливе місце займає проблема завадозахищеності ліній та мереж цифрового радіозв'язку. Очевидно, що забезпечити захист цифрових ліній військового або цивільного радіозв'язку від великого різноманіття навмисних або ненавмисних завад з використанням будь-якого одного методу неможливо. На вирішення даної проблеми більше ніж півсторіччя спрямована велика кількість робіт, наприклад, [1, 2]. По теперішній час виникає необхідність

серед множини технічних методів боротьби із завадами вибирати деяку раціональну їх сукупність, що забезпечуватиме виконання сучасних вимог до завадозахищеності цифрових ліній радіозв'язку [3, 4].

В межах зазначеної проблеми актуальним є пошук ефективних шляхів підвищення завадозахищеності прийому корисного цифрового сигналу (ЦС) в умовах впливу навмисних завад, які подібні за своєю структурою до корисного сигналу.

Пропонується для підвищення завадозахищеності прийому корисного ЦС, що приймається в умовах адитивного впливу потужної структурної зава-

ди, використовувати в демодуляторах приймальних пристроїв компенсаційні процедури [5, 6].

Метою дослідження і основним змістом статті є аналіз завадозахищеності когерентної демодуляції корисного ЦС з мінімальною частотною маніпуляцією (*minimum-shift keying* — *MSK*) в умовах впливу синхронної по тактовим точкам до корисного сигналу потужної подібної завади, синтез математичної моделі якої наведений в [6, 7].

Для досягнення поставленої мети слід вирішити ряд часткових задач, а саме:

- синтезувати функціональну схему когерентного демодулятора синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*;
- розробити імітаційну модель цифрової радіо лінії, яка функціонує в умовах впливу потужної *MSK* завади, з реалізацією на приймальній стороні функціональної схеми когерентного демодулятора синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*;
- провести ряд експериментів для низки відношень сигнал/шум та сигнал/завада в каналі зв'язку;
- оцінити та провести аналіз завадозахищеності когерентного прийому корисного ЦС з *MSK* в умовах дії синхронної потужної структурної завади.

1 Синтез функціональної схеми когерентного демодулятора синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*

Представимо сигнал з *MSK* на k -му тактовому інтервалі таким виразом [7].

$$s(\hat{r}_k, t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \hat{r}_k \omega_d t + \theta_k), \quad t \in [t_{k-1}, t_k), \quad (1)$$

де $\hat{r}_k = -(-1)^{r_k}$, $\hat{r}_k = \overline{-1, 1}$, $r_k = \overline{0, 1}$, $k = 1, 2, 3, \dots$ — дискретний параметр (ДП); A_0 — амплітуда *MSK*-сигналу; $\omega_d = \frac{\pi}{2T}$ — девіація частоти; $\theta_k = \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \hat{r}_i - \frac{(k-1)\pi}{2} \hat{r}_k = -\frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^{k-1} (-1)^{r_i} + \frac{(k-1)\pi}{2} (-1)^{r_k}$ — початкова фаза сигналу на k -му тактовому інтервалі. Для зручності запису використовуються обидва застосованих в раніше відомих публікаціях [6, 7] визначення ДП $\hat{r}_i = -(-1)^{r_i}$.

Вважатимемо, що корисний сигнал з *MSK* $s_1(r_s; t)$ та потужна структурна завада $s_2(r_z; t)$ розповсюджуються в стаціонарному каналі радіозв'язку, їхні частотні позиції та тактові точки співпадають, а неінформаційні параметри точно відомі.

З урахуванням (1) представимо модель вхідного спостереження на тривалості одного тактового інтервалу:

$$y(t) = s_1(r_s; t) + s_2(r_z; t) + n(t), \quad (2)$$

де $n(t)$ — адитивний білий гаусівський шум (АБГШ) з односторонньою спектральною щільністю потужності N_0 .

Використовуючи методику синтезу процедур когерентно-некогерентної демодуляції корисного сигналу в умовах впливу потужної подібної завади [3] було отримано правило прийняття рішення (ППР) про переданий ДП корисного ЦС з *MSK* [6, 7]:

$$r_s^* = \text{rect} \left\{ \left(\frac{b_1(1) - b_1(0)}{2} \right) - \text{Arth} \left[\text{th} \left(\frac{b_2(0) - b_2(1)}{2} \right) \cdot \text{th} (R_{12}(1, 0) - R_{12}(1, 1)) \right] \right\} \quad (3)$$

де $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ — вирішуюча функція;

$b_1(r_s) = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y(t) s_1(r_s; t) dt$ — відношення подвоєного скалярного добутку вхідного спостереження (2) і корисного сигналу $s_1(r_s; t)$ на довжині тактового інтервалу $[t_{k-1}, t_k]$ до односторонньої спектральної щільності потужності АБГШ;

$b_2(r_z) = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y(t) s_2(r_z; t) dt$ — відношення подвоєного скалярного добутку вхідного спостереження (2) та структурної завади $s_2(r_z; t)$ на довжині тактового інтервалу $[t_{k-1}, t_k]$ до односторонньої спектральної щільності потужності АБГШ;

$R_{12}(r_s; r_z) = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} s_1(r_s; t) s_2(r_z; t) dt$ — відношення скалярного добутку корисного сигналу $s_1(r_s; t)$ та структурної завади $s_2(r_z; t)$ на довжині тактового інтервалу $[t_{k-1}, t_k]$ до односторонньої спектральної щільності потужності АБГШ;

$$r_s = \overline{0, 1}; r_z = \overline{0, 1}.$$

На основі ППР (3) синтезовано функціональну схему когерентного демодулятора розділення на одному тактовому інтервалі синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*, яка зображена на рис. 1.

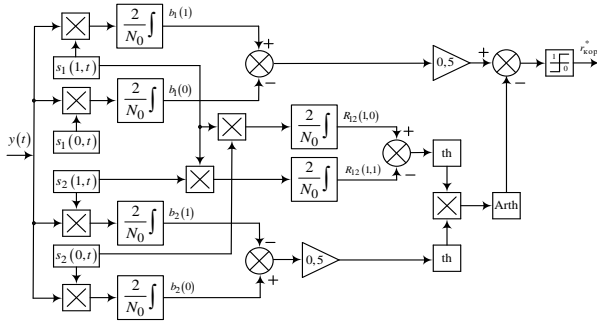


Рис. 1. Функціональна схема когерентного демодулятора розділення синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*

Сутність синтезованої функціональної схеми полягає в тому, що вона описує процес компенсації впливу структурної завади з *MSK* на виході корелятора сигнальної гілки демодулятора. Відмінною особливістю даної функціональної схеми від загальновідомої класичної когерентної демодуляції сигналу з *MSK* є наявність компенсаційного тракту. При цьому компенсуючі напруги формуються на основі опорних коливань сигналу і завади, а їх знаки — на виході завадової гілки демодулятора.

Якщо в (3) модулі величин $b_2(0) - b_2(1)$ суттєво перевищують одиницю (тобто складові завади за миттєвою потужністю набагато більше корисного сигналу) правило прийняття рішення можна суттєво спростити $\text{th}(x \gg 1) \approx 1$; $\text{th}(x \ll 1) \approx -1$.

$$r_s^* = \text{rect} \left\{ \left(\frac{b_1(1) - b_1(0)}{2} \right) - \text{sign} \left(\frac{b_2(0) - b_2(1)}{2} \right) \cdot (R_{12}(1,0) - R_{12}(1,1)) \right\}, \quad (4)$$

де $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ — сигнальна функція.

Спрощене представлення (4) моделі розділення (3) дозволяє аналітично продемонструвати процедуру компенсації потужної *MSK*-завади, подібної корисному сигналу з *MSK*. Демонстрація функціонування ППР (4) наведена в табл. 1.

Тут $h_1^2(r_s) = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} s_1^2(r_s, t) dt$ — енергія корисного *MSK*-сигналу на довжині тактового інтервалу $[t_{k-1}, t_k]$ до односторонньої спектральної щільності потужності АБГШ; $R_{12}(1;0) \approx R_{12}(0;1)$; $R_{12}(1;1) \approx R_{12}(0;0)$ — енергія корисного *MSK*-сигналу та *MSK*-завади; $\text{argrect}(x)$ — аргумент ППР (4).

При складанні табл. 1 з метою прозорості пояснень наявність шумових складових на виходах кореляторів схеми рис. 1 не враховувались.

2 Імітаційна модель цифрової радіолінії з реалізацією на приймальній стороні функціональної схеми когерентного демодулятора синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*

За допомогою середовища комп'ютерного моделювання *Matlab R2017b* з пакетом розширення *Simulink* розроблено цифрову радіолінію, що функціонує в умовах впливу потужної *MSK*-завади, на приймальній стороні якої використовується когерентний демодулятор синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*.

Визначення завадозахищеності когерентного прийому корисного сигналу з *MSK* в умовах впливу потужної подібної завади проведено за таких початкових умов:

- індекс маніпуляції корисного *MSK*-сигналу та структурної *MSK*-завади дорівнює 0,5;
- модель вхідного спостереження є адитивною сумішшю корисного *MSK*-сигналу, потужної подібної завади та АБГШ;
- канал радіозв'язку з постійними (повільно змінними) параметрами у порівнянні з тривалістю тактового інтервалу;
- завада перевищує корисний сигнал за миттєвою потужністю;
- частотні позиції і тактові точки корисного сигналу та завади співпадають.

Блок-схема імітаційної моделі цифрової радіолінії, що функціонує в умовах впливу потужної *MSK*-завади, зображена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема імітаційної моделі цифрової радіолінії, що функціонує в умовах впливу потужної *MSK*-завади

Імітаційна модель корисного *MSK*-сигналу, потужної подібної завади та вхідного спостереження в середовищі розповсюдження зображена на рис. 3. При формуванні корисного *MSK*-сигналу та *MSK* було використано квадратурний метод формування *MSK*-сигналу [8, 9].

Табл. 1 Демонстрація функціонування правила прийняття рішення (4)

$r_{\text{кор.}}$	$r_{\text{зав.}}$	$\frac{b_1(1) - b_1(0)}{2}$	$\frac{b_2(0) - b_2(1)}{2}$	$\arg \text{rect}(x)$	$r_{\text{кор.}}^*$
0	0	$R_{12}(1, 0) - h_1^2(0) - R_{12}(0, 0)$	$-R_{12}(0, 1) + R_{12}(0, 0) + h_2^2(0)$	> 0	$-h_1^2(0)$
0	1	$R_{12}(1, 1) - h_1^2(0) - R_{12}(0, 1)$	$-R_{12}(0, 1) - h_2^2(1) + R_{12}(0, 0)$	< 0	$-h_1^2(0)$
1	0	$h_1^2(1) + R_{12}(1, 0) - R_{12}(0, 0)$	$-R_{12}(1, 1) + R_{12}(1, 0) + h_2^2(0)$	> 0	$h_1^2(1)$
1	1	$h_1^2(1) + R_{12}(1, 1) - R_{12}(0, 1)$	$-R_{12}(1, 1) - h_2^2(1) + R_{12}(1, 0)$	< 0	$h_1^2(1)$

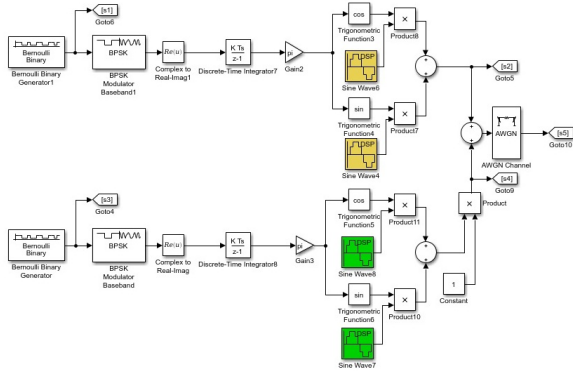


Рис. 3. Імітаційна модель корисного *MSK*-сигналу, потужної подібної завади та вхідного спостереження

В квадратурному представленні *MSK*-сигнал має вид [8, 9]:

$$\begin{aligned}
 s(t) &= I(t) \cos(\omega_0 t) - Q(t) \sin(\omega_0 t) = \\
 &= \cos\left(\omega_d \int_0^t b_0(t) dt\right) \cos(\omega_0 t) - \\
 &\quad - \sin\left(\omega_d \int_0^t b_0(t) dt\right) \sin(\omega_0 t), \quad (5)
 \end{aligned}$$

де $I(t)$ і $Q(t)$ — дійсна і уявна компоненти комплексної огибаючої (синфазна і квадратурна компоненти); ω_d — девіація частоти; ω_0 — несівна частота; $b_0(t)$ — біполярна вхідна дискретна послідовність.

На рис. 3 верхня гілка імітаційної моделі відповідає за формування корисного *MSK*-сигналу, нижня за формування *MSK*-завади. Генератори випадкових дискретних параметрів (*Bernoulli Binary Generator*) корисного сигналу та завади генерують уніполярні дискретні вхідні послідовності корисного сигналу та завади, що розподілені за законом Бернуллі. Номінальне значення амплітуди ДП корисного *MSK*-сигналу та *MSK*-завади — 1 В, тривалість їхнього тактового інтервалу (дискретного параметра) — 1 с.

Блок формування двійкової фазової маніпуляції (*BPSK Modulator Baseband*) здійснює перетворення уніполярної дискретної послідовності у біполярну $b_0(t)$. Інтегратор (*Discrete-Time Integrator*), підсилювач (*Gain*) та блоки функцій (\cos , \sin) формують синфазну $I(t)$ та квадратурну $Q(t)$ складову (5), як корисного *MSK*-сигналу так і *MSK*-завади. Генератори синусоїдальних сигналів (*Sine Wave*), для кращої візуалізації, генерують синусоїдальні та ко-

синусоїдальні (початкова фаза коливання зсунута на 90°) несівні з амплітудами 1В (генератори жовтого кольору) для *MSK*-сигналу та 7В (генератори зеленого кольору) для формування *MSK*-завади на частотах $\omega_0 = 2\text{Hz}$. На виході кінцевого суматора (*SUM*) формується вхідне спостереження шляхом адитивного складання корисного *MSK*-сигналу та потужної синхронної *MSK*-завади.

Для забезпечення імітації реальних умов розповсюдження радіохвиль використовується стандартний модуль (*AWGN Channel*), який імітує канал з АБГШ та дає можливість встановлювати задане відношення сигнал/шум $h_1^2 = 0 \div 14,02 \text{ dB}$ при введенні вхідних даних для моделювання.

На рис. 4 представлені осцилограми, отримані за допомогою осцилографа (*TimeScope*), в контрольних точках імітаційної моделі корисного *MSK*-сигналу, потужної подібної завади та результат моделювання — вхідного спостереження $y(t)$.

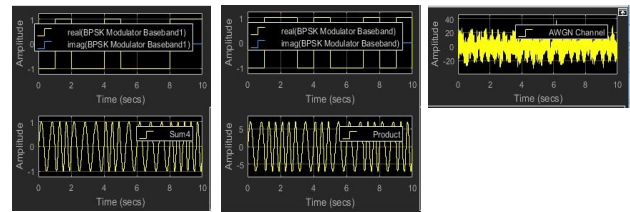


Рис. 4. Осцилограми сигналів в контрольних точках імітаційної моделі корисного *MSK*-сигналу, потужної *MSK*-завади та вхідного спостереження $y(t)$

Розглянемо імітаційну модель когерентного демодулятора взаємно неортогональних ЦС з *MSK* (див. рис. 6), яка відповідає функціональній схемі когерентного демодулятора синхронних за тактовими точками корисного *MSK*-сигналу та потужної *MSK*-завади (рис. 1).

На вхід схеми надходить вхідне спостереження $y(t)$, яке сформоване в *AWGN Channel* при заданому відношенні сигнал/шум h_1^2 . Генератори *Sine Wave* генерують синусоїдальні та косинусоїдальні несівні з параметрами, які задані на передавальній стороні.

Табл. 2 Розраховані значення сигнал/шум h_1^2 та загальна кількість N_{sum} ДП корисного сигналу, що оброблялися імітаційною моделлю

$P_{\text{error.exp.}}$	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0.5
h_1^2 (дБ)	13.32	12.61	10.79	9.65	8.01	5.01	0
N_{sum}	10^{10}	10^9	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4

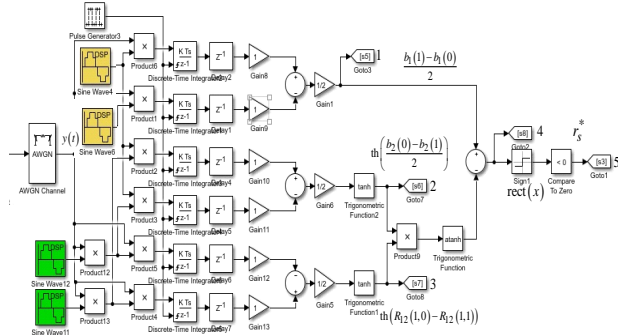


Рис. 5. Імітаційна модель когерентного демодулятора розділення на одному тактовому інтервалі синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*

Перша гілка імітаційної моделі на тривалості тактового інтервалу $[t_{k-1}, t_k)$ формує коливання двох видів $\frac{b_1(1)}{2}$ або $-\frac{b_1(0)}{2}$ і відповідає за визначення того, який ДП корисного *MSK*-сигналу передавався на даному тактовому інтервалі.

Третя гілка імітаційної моделі відповідає за формування взаємної енергії $R_{12}(1;0) \approx R_{12}(0;1)$ або $R_{12}(1;1) \approx R_{12}(0;0)$ [9, 10] в залежності від того, яка комбінація ДП корисного сигналу та завади передається на тривалості тактового інтервалу $[t_{k-1}, t_k)$.

Друга гілка моделі відповідає за визначення шляхів компенсації (додавання чи віднімання) сформованої взаємної енергії корисного сигналу та завади в каналі зв'язку від коливання корисного сигналу $\frac{b_1(1)-b_1(0)}{2}$.

Модуль *sign* реалізує функцію рішення *rect(x)* формуючи на своєму виході рішення про переданий дискретний параметр корисного *MSK*-сигналу r_s^* з номінальним значенням амплітуди $A_s = 1\text{В}$ та тривалістю $T_s = 1\text{с}$.

На рис. 6 представлені осцилограми отримані в контрольних точках імітаційної моделі когерентного демодулятора розділення на одному тактовому інтервалі синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK* (умови моделювання: $A_s = 1\text{В}$; $T_s = 1\text{с}$; $A_z = 7\text{В}$; $T_z = 1\text{с}$; $\omega_0 = 2\text{Hz}$; $h_1^2 = 7\text{дБ}$).

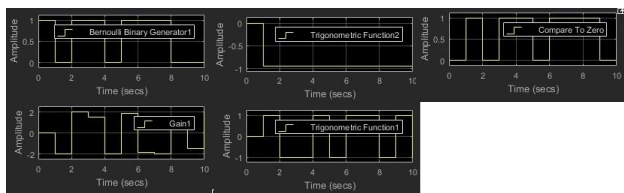


Рис. 6. Осцилограми сигналів в контрольних точках імітаційної моделі когерентного демодулятора синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*

Принципальна схема пристрою обчислення ймовірності помилки прийому ДП корисного *MSK*-сигналу (*Statistics*) зображена на рис. 7.

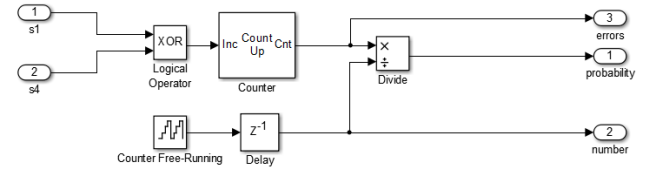


Рис. 7. Схема пристрою обчислення ймовірності помилки прийому ДП корисного *MSK*-сигналу (*Statistics*)

Загальна кількість неправильно прийнятих (демодульованих) ДП визначається в блоці *Logical Operator* (*XOR*) шляхом складання по модулю 2 переданої інформаційної послідовності ДП (вхід *s1*) з послідовністю, яка отримана після компенсації потужної структурної завади та демодуляції корисного *MSK*-сигналу (вхід *s4*). Залежно від кількості помилок, виявлених при порівнянні послідовностей, визначається в блоці *Divide* ймовірність помилки прийому

$$P_{\text{error}}^* = \frac{N_{\text{error}}}{N_{\text{sum}}},$$

де N_{error} — кількість помилково прийнятих ДП корисного сигналу; N_{sum} — загальна кількість ДП корисного сигналу, що передавалися.

3 Аналіз завадозахищеності когерентного прийому корисного ЦС з *MSK* в умовах дії синхронної потужної структурної завади

Для порівняльного аналізу завадозахищеності, як прототип, обрано потенційну завадозахищеність когерентного прийому *MSK*-сигналу в каналі без потужної подібної завади з постійними параметрами.

При когерентній демодуляції *MSK*-сигналу ймовірність помилкового прийому ДП корисного сигналу для низки відношень сигнал/шум визначається за такою формулою [10]:

$$P_{\text{error.MSK}} = 2P_{\text{error.PM}} (1 - P_{\text{error.PM}}).$$

Через те, що рішення про переданий ДП корисного *MSK*-сигналу в (4) приймається при обробці входного спостереження на одному тактовому інтервалі,

Табл. 3 Ймовірності помилкового прийому ДП $P_{\text{error.expec}}$ корисного сигналу з *MSK* при $\Delta h^2 = 0$ дБ та $\Delta h^2 = 7$ дБ)

$\Delta h^2 = 0$ дБ							
$P_{\text{error.expec}}$	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0.5
h_1^2 (дБ)	13.32	12.61	10.79	9.65	8.01	5.01	0
N_{sum}	10^{10}	10^9	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4
$\Delta h^2 = 7$ дБ							
$P_{\text{error.expec}}$	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0.5
h_1^2 (дБ)	13.32	12.61	10.79	9.65	8.01	5.01	0
N_{sum}	10^{10}	10^9	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4

тому очікується, що асимптотична завадозахищеність когерентної демодуляції синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK* виявиться такою ж, як і для когерентної демодуляції частотно маніпульованого (*frequency-shift keying* — *FSK*) сигналу в каналі зв'язку без завади.

В табл. 2 зазначені розраховані значення сигнал/шум h_1^2 , які в подальшому задавалися в модулі *AWGN Channel* для визначення за допомогою розробленої імітаційної моделі очікуваної ймовірності помилки $P_{\text{error.expec}}$ демодуляції корисного *MSK*-сигналу, що спостерігається на фоні структурної завади, та загальна кількість значень ДП корисного сигналу, що оброблялася:

$$N_{\text{sum}} \geq \frac{(1 - P_{\text{error.expec}}) P_{\text{error.expec}}}{(1 - \chi) \varepsilon^2},$$

де $P_{\text{error.expec}}$ — очікувана ймовірність помилки; χ — надійність того, що $P_{\text{error.expec}}$ співпаде з реальною ймовірністю помилки з похибкою, що не перевищує ε .

Отримані в результаті імітаційного моделювання ймовірності помилкового прийому ДП $P_{\text{error.expec}}$ корисного сигналу з *MSK*, що спостерігається на фоні структурної завади для низки значень Δh^2 (дБ) = $h_2^2 - h_1^2 > 0$ наведені в табл. 3. Тут

$$h_2^2 = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} s_1^2(r_z, t) dt$$

є енергією *MSK*-завади на довжині тактового інтервалу $[t_{k-1}, t_k]$ до односторонньої спектральної щільності потужності АБГШ.

На рис. 8 зображена ймовірність помилкового прийому ДП P_{error}^* корисного ЦС з *MSK* в умовах впливу подібної завади для низки значень сигнал/завада Δh^2 .

Висновки

Розроблена, за допомогою середовища комп'ютерного моделювання *Matlab R2017b* з пакетом розширення *Simulink*, імітаційна модель дозволила:

- перевірити працездатність синтезованої функціональної схеми когерентного демодулятора розділення синхронних взаємно неортогональних ЦС з *MSK*;
- провести ряд експериментів для низки відношень сигнал/шум h_1^2 та сигнал/завада Δh^2 в каналі зв'язку;
- методами теорії потенціальної завадостійкості оцінити завадозахищеність демодуляції корисного *MSK*-сигналу в умовах впливу подібної завади;
- методами статистичної обробки отриманих результатів здійснити перевірку синтезованої математичної моделі (3) на адекватність.

Аналіз завадозахищеності когерентного прийому *MSK*-сигналу в умовах впливу потужної *MSK*-завади показав, що при перевищенні миттєвої потужності *MSK*-завади, більше ніж на 7 дБ, над миттєвою потужністю корисного сигналу негативний вплив на завадозахищеність прийому останнього наближається до нуля, а завадозахищеність прийому наближається до потенціальної завадозахищеності когерентного прийому *FSK*-сигналу.

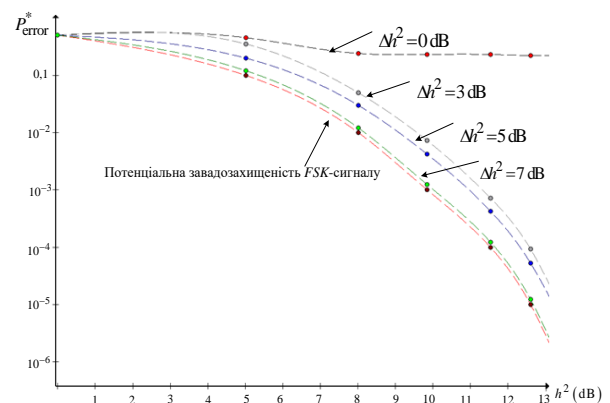


Рис. 8. Графік залежності ймовірності помилкового прийому ДП P_{error}^* при когерентній демодуляції корисного сигналу з *MSK* для низки значень Δh^2

Перелік посилань

1. Козлов С. В. Оценочно-компенсационный алгоритм селекции имитационных помех / С. В. Козлов // Бело-

- русский государственный университет информатики и радиоэлектроники. — 2018. — № 2 (112). — С. 18–25.
2. Сосулин Ю. Г. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех / Ю. Г. Сосулин, В. В. Костров, Ю. Н. Паршин / М.: Радиотехника, 2014. — 632 с.
 3. Бобровский В. И. Многопользовательское детектирование / Бобровский В. И.; под ред. Д. Л. Бураченко — Ульяновск.: Вектор-С, 2007. — 346 с.
 4. Verdu S. *Multiuser Detection*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 474 p.
 5. Єрохін В. Ф. Математична модель процедури некогерентної демодуляції цифрового сигналу з частотною маніпуляцією, що спостерігається на фоні потужної подібної завади / В. Ф. Єрохін, Є. В. Пелешок // Прикладная радиоэлектроника — 2015. — Том. 14, № 2 — С. 160–165.
 6. Єрохін В. Ф. Математична модель розділення асинхронних взаємно неортогональних цифрових сигналів з мінімальною частотною маніпуляцією / В. Ф. Єрохін, Є. В. Пелешок // Сучасний захист інформації. — 2016. — №. 1. — С. 4–13.
 7. Пелешок Є. В. Математична модель когерентної демодуляції взаємозважаючих цифрових сигналів з мінімальною частотною маніпуляцією / Є. В. Пелешок // Проблеми телекомунікацій. — 2015. — № 2 (17). — С. 26–35.
 8. Кузьмин Е. В. Параметризованная модель квадратурного модулятора MSK-сигнала / Е. В. Кузьмин, Ф. Г. Зограф // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1.
 9. Pasupathy S. Error-Control Properties of Minimum Shift Keying / S. Pasupathy, H. Leib // IEEE Communications Magazine. — 1993. — pp. 52–61.
 10. Яманов Д. Н. Повторное использование частот в каналах связи с минимальной частотной манипуляцией сигналов / Д. Н. Яманов, С. С. Жаворонков // Научный вестник МГТУ ГА. Серия Радиофизика и радиотехника. — 2006. — № 98 (2). — С. 55–60.
 - [6] Yerokhin V.F., Peleshok Ye.V. (2016) Matematychna model rozdilennia asynkhronnykh vzaiemno neortogonalnykh tsyfrovyykh syhnaliv z minimalnoiu chastotnoiu manipuliatsiieiu. *Suchasnyi zakhyst informatsii*, No. 1, pp. 4–13.
 - [7] Peleshok Ye.V. (2015) Matematychna model koherentnoi demoduliatzii vzaiemnozavazhaiuchykh tsyfrovyykh syhnaliv z minimalnoiu chastotnoiu manipuliatsiieiu. *Problemy telekomunikatsii*, No 2 (17), pp. 26–35.
 - [8] Kuz'min E.V., Zograf F.G. (2016) Parametrizovannaya model' kvadraturnogo modulyatora MSK-signalu. *Inzhenernyi vestnik Dona*, Np 1.
 - [9] Leib H. and Pasupathy S. (1993) Error-control properties of minimum shift keying. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 31, Iss. 1, pp. 52-61. DOI: 10.1109/35.180074
 - [10] Yamanov D.N., Zhavoronkov S.S. (2006) Povtornoie ispol'zovanie chastot v kanalakh svyazi s minimal'noi chastotnoi manipulyatsiei signalov. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Seriya Radiofizika i radiotekhnika*, No 98 (2), pp. 55–60.

Анализ помехозащищенности когерентной демодуляции синхронных взаимно неортогональных цифровых сигналов с минимальной частотной манипуляцией

Рома А.Н., Пелешок Е.В., Голь В.Д., Василенко С.В.

Целью исследования и основным содержанием статьи есть анализ помехозащищенности когерентной демодуляции полезного цифрового сигнала (ЦС) с минимальной частотной манипуляцией (minimum-shift keying – MSK) в условиях воздействия мощной структурной помехи. Анализ помехозащищенности приема MSK-сигнала в условиях воздействия мощной MSK-помехи показал, что при превышении мгновенной мощности MSK-помехи, более чем на 7 дБ, над мгновенной мощностью полезного сигнала негативное влияние на помехозащищенность приема последнего стремится к нулю, а помехозащищенность приема приближается к потенциальной помехозащищенности когерентного приема frequency-shift keying-сигнала.

Ключевые слова: помехозащищенность; когерентный прием; неортогональные сигналы; минимальная частотная манипуляция; имитационная модель

Noise Immunity Analysis of Coherent Demodulation of Synchronous Mutually non-Orthogonal Digital Signals with Minimum-Shift Keying

Roma O.M., Peleshok Ye.V., Hol V.D., Vasilenko S.V.

Introduction. With the provision of the necessary level of economic and defense potential of the state, the problem of protection of lines and networks of digital radio is of high importance. There is a need among the set of technical methods to combat the obstacles to choose their rational set, which will ensure the implementation of modern requirements for noise immunity of digital radio links. The purpose of the study and the basis of the article is to analyze the protection of coherent demodulation of a

References

- [1] Kozlov S.V. (2018) *Otsenочно-kompensatsionnyi algoritm selektsii imitatsionnykh pomekh*. Belorusskii gosudarstvennyi universitet informatiki i radioelektroniki, No 2 (112), pp. 18-25.
- [2] Sosulin Yu.G., Kostrov V.V. and Parshin Yu.N. (2014) *Otsenочно-korrelyatsionnaya obrabotka signalov i kompensatsiya pomekh*. Radiotekhnika, 632 p.
- [3] Bobrovskii V.I. (2007) *Mnogopol'zovatel'skoe detektirovanie*. Vektor-S, 346 s.
- [4] Verdu S. (1998) *Multiuser Detection*. Cambridge University Press, 474 p.
- [5] Yerokhin V.F., Peleshok Ye.V. (2015) Matematychna model protsedury nekoherentnoi demoduliatzii tsyfrovoho syhnalu z chastotnoiu manipuliatsiieiu, shcho sposterihaetsia na foni potuzhnoi podobnoi zavady. *Prykladnaia radioelektronika*. Vol. 14, No 2, pp. 160–165.

useful digital signals with frequency minimum-shift keying (MSK) under conditions of strong powerful obstacle.

Theoretical results. In order to achieve this goal, a number of partial tasks were solved in the article, namely: a functional diagram of a coherent demodulator of synchronous mutually nonorthogonal digital signals with MSK was synthesized; the simulation model of the digital radio line, which operates under the conditions of a powerful MSK-obstacle, is developed, with the implementation on the receiving side of the functional scheme of the coherent demodulator of synchronous mutually nonorthogonal digital signals with MSK; a series of experiments were conducted for a number of signal-to-noise ratios and signal-to-obstacle in the communication channel; the analysis of the interference protection were conducted of coherent reception of a useful digital signals with MSK in conditions of synchronous strong powerful obstacle.

Conclusions. In the absence of MSK-obstacle the coherent demodulator of synchronous mutually nonorthogonal digital signals with MSK degenerates into a classical coherent demodulator of MSK-signal. The analysis reception protection of the MSK-signal under conditions of the influence of a powerful MSK-obstacle has shown that in case of exceeding the instantaneous power of MSK-obstacle, more than 7 dB over the instantaneous power of a useful signal, the negative influence on the noise immunity of receiving the latter is close to zero, and the noise immunity of reception is approaching of the coherent reception of the frequency-shift keying signal.

Key words: noise immunity; coherent reception; non-orthogonal signals; minimum frequency shift keying; simulation model