

ТУРОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР

Національний авіаційний університет

ORCID ID: 0000-0002-4961-0876

e-mail: s19641011@ukr.net.

МЕЛЕШКО ТЕТЯНА

Національний авіаційний університет

ORCID ID: 0000-0002-9278-8987

e-mail: sorokunnet@ukr.net

ОЦІНКА ВПЛИВУ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЇ ЗАВАДИ НА ІМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ КОГЕРЕНТНОГО ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ З БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ

В статі вирішується нове актуальне наукове завдання щодо оцінки впливу мультипликативної завади на імовірність біткової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією. Розроблено та подано модель оцінки впливу мультипликативної завади на імовірність біткової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією. Подана модель основана на імовірнісних характеристиках появи символної та біткової помилки сигналу з багатопозиційною фазовою модуляцією відносно прийнятого рівня інтенсивності мультипликативної завади для різних значень співвідношень сигнал/шум на вході когерентного приймача.

Результати оцінки імовірність біткової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією при наявності в складі вхідного сигналу мультипликативної завади показали наступне. Мультипликативна завада з відносним середнім значенням інтенсивності $\mu = 0,1$, дисперсією амплітуди $0,01$ та дисперсією фази $0,01 \text{ рад}^2$ для 2-ФМ та 4-ФМ дає при імовірності біткової помилки $0,001$ погіршення співвідношення сигнал/шум від $0,3$ до 1 дБ. Для сигналів з 8-ФМ та 16-ФМ це погіршення може становити від $2,5$ та 5 дБ, відповідно. При збільшенні дисперсії флуктуацій негативна дія мультипликативної завади значно зростає. У райсієвському каналі на завадостійкість прийому сигналів з малою позиційністю ($M < 8$) більш істотний вплив мають флуктуації амплітуди, ніж фази. При $M > 8$ вплив фазових флуктуацій на значення імовірності помилки суттєво зростає.

Подані результати можуть бути застосовані при розробці нових та удосконалені існуючих телекомунікаційних систем, заснованих на технології передачі сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Ключові слова: багатопозиційна фазова маніпуляція, завадозахищеність телекомунікаційної мережі, мультипликативні завади.

TUROVSKY OLEKSANDR, MELESHKO TETIANA

National Aviation University

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF MULTIPLICATIVE INTERFERENCE ON THE BIT ERROR PROBABILITY OF COHERENT RECEPTION OF SIGNALS WITH MULTIPosition PHASE SHIFT KEYING

In the article, there is a new topical scientific task to estimate the impact of the multiplicative problem on the probability of the bit error of the coherent signal reception with the rich positional phase shift keying. The model for evaluating the injection of a multiplicative input on the immovability of a bit error of a coherent signal reception with rich positional phase manipulation has been disassembled and submitted. The given model is based on the movable characteristics of the appearance of a symbolic and bit error to a signal with a rich positional phase modulation of the received level of the intensity of the multiplicative input for different values of the signal-to-noise ratio at the input of the coherent receiver.

The results of the evaluation of the immovability of the bit error of the coherent receiving signal with a rich positional phase manipulation with the presence of the multiplicative input signal in the warehouse showed the advance. A multiplicative task with an apparent mean value of intensity $\mu = 0.1$, an amplitude dispersion of 0.01 and a phase dispersion of 0.01 rad^2 for BPSK and QPSK is given with a bit-cutting intensity of 0.001 signal/noise ratio 0.3 to 1 dB. For signals with 8PSK and 16PSK, the attenuation can be 2.5 and 5 dB, obviously. With increased dispersion fluctuations, the negative effect of the multiplicative wave increases significantly. In the district channel, for the reliability of receiving signals with a small position ($M < 8$), there is a larger influx of fluctuations in amplitude, lower phase. At $M > 8$, the inflow of phase fluctuations on the value of the smoothness of the error is essentially growing. The presented results can be applied in the development of new and improved existing telecommunication systems based on signal transmission technology with multi-position phase shift keying. The solution of the problem of estimating the influence of multiplicative interference on the probability of a bit error of coherent reception of input signals is aimed at improving the efficiency of functioning of telecommunication facilities based on a signal with multiposition phase shift keying.

Keywords: multi-position phase shift keying, interference immunity of the telecommunication network, multiplicative interference.

Вступ та постановка проблеми

Забезпечення високого рівня ефективності передачі дискретних сигналів в умовах додержання високих вимог до спектральної та енергетичної ефективності та завадостійкості вимагають постійного удосконалення та розвитку існуючих технологій передачі даних. Однією з найбільш відомих та ефективних технологій, що широко застосовуються в сучасних телекомунікаційних мережах (ТКМ) є технології передачі сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією (БФМ) [1].

Системи передачі сигналів на основі технології БФМ достатньо широко використовуються у різних

телекомунікаційних мережах цифрових систем передачі. Таких як супутникові лінії зв'язку, системи цифрового телебачення (DVB-S і DVB-S2/S2X), безпроводові та стільникові телекомунікаційні мережі.

Розвиток та удосконалення технології БФМ вимагає опрацювання низки наукових задач безпосередньо направлених на обмеженнями шкідливих процесів, які чинять негативний вплив на швидкість передачі цифрових даних, цілісність їх пакетів та достовірність отриманих сигналів. Очевидним є, що одним з таких негативних процесів є вплив завад та перешкод різного характеру, які не дозволяють певним чином підтримувати необхідний рівень ефективності ТКМ через зниження рівня завадозахищеності сигналу та втрату частини корисних даних в процесі їх прийому вхідним пристроєм ТКМ [2,3].

Необхідно відмітити, що в процесі бездротової передачі даних поряд з існуючими процесами формування флуктуаційних та нефлуктуаційних імпульсних завад можуть виникнути процеси перевідбиття електромагнітних хвиль від будівель, навколишніх предметів та інших поверхонь. Тобто може сформуватися певна багатопроменевість каналу передачі даних, наслідком якої буде поява мультиплікативної завади (райсівський канал) [2, 4].

Основною характеристикою мультиплікативної завади є неперіодичність дії, викликана появою на вході тракту прийому корисного сигналу неперіодичних послідовностей одиночних імпульсів, що приходять в канал в процесі перевідбиття корисного сигналу від різних відбиваючих поверхонь. [2, 3]. Наслідком такого прийому є зниження рівня завадозахищеності, яке буде проявлятися з виникненням бітової помилки, значення якої оцінюється імовірністю її появи [2, 4].

Поява в прийомному тракту обробки вхідних сигналів ТКМ на основі технології БФМ, зовнішніх неперіодичних відбитих шкідливих сигналів формує нове наукове завдання щодо оцінки впливу мультиплікативної завади на імовірність бітової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Вирішення завдання щодо оцінки впливу мультиплікативної завади на імовірність бітової помилки когерентного прийому вхідних сигналів має на меті підвищення ефективності функціонування ТКМ на базі сигналу з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Для вирішення визначеного наукового завдання необхідно:

– розробити математичні залежності та на їх основі цілісну модель оцінки впливу мультиплікативної завади на імовірність бітової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією;

– провести оцінку впливу мультиплікативної завади на імовірність бітової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Аналіз останніх джерел

Питанням дослідження впливу завад різного характеру на ефективність функціонування ТКМ на базі сигналу БФМ та розробці окремих алгоритмів оцінки їх впливу на процес прийому дискретних сигналів присвячено ряд робіт [3-7].

Робота [3] подано математичні залежності і на їх основі описана моделі каналу зв'язку телекомунікаційної системи на базі сигналу БФМ, що враховує вплив спрямованої дії навмисно організованих завад та збурень. Для зменшення впливу таких збурень запропоновано застосування часового захисного інтервалу та компенсація частини втраченої інформації копіювання даних з сусіднього каналу. Питання безпосередньої оцінки впливу мультиплікативної завади на імовірність появи бітової помилки сигналу БФМ в даній роботі не розглядалися.

В роботі [4] подано результати оцінки впливу нефлуктуаційних завад на когерентний прийом сигналу з БФМ. В даній роботі запропоновано критерій оцінки впливу нефлуктуаційних завад розглянуто вплив імпульсної завади на завадозахищеність прийому БФМ. Питання оцінки впливу безпосередньо мультиплікативної завади в роботі не розглядалися.

Роботи [5, 6] присвячені питанню обмеження впливу позасмугових радіо сигналів в системах передачі даних з ортогональним частотним розподілом. Вказані радіосигнали в роботі визначені як нефлуктуаційні завади від зовнішніх шкідливих джерел. Для зменшення їх впливу запропоновано нову структуру кодової конструкції дискретного сигналу, що дозволяє приймачу вхідного сигналу використовувати класичний оцінювач каналу БФМ. При цьому, питання впливу перешкод різного характеру на завадозахищеність та оцінка такого впливу на імовірність появи бітової помилки в даних роботах не відсутні.

Питання оцінки бокового перевідбитого сигналу, який можна кваліфікувати як мультиплікативну заваду подано в роботі [7]. Запропоновано спосіб по зменшенню блокової діагоналізації перевідбитого сигналу на лініях передачі даних та розподілу потужності з урахуванням як наявності, так і відсутності інформації про стан каналу в багато користувачьких телекомунікаційних мережах на основі сигналів МІМО-OFDM. Безпосередній вплив відхилення параметрів одного з каналів передачі даних, та формування негативного впливу від нього на імовірність появи бітової помилки в даній роботі не розглядалися.

Таким чином, аналіз публікацій, присвячених розгляду впливів нефлуктуаційних завад на ефективність прийому сигналів БФМ дозволив виявити невідповідності, що стосуються безпосередньої оцінки впливу мультиплікативних завад на імовірність появи бітової помилки сигналів БФМ в процесі їх когерентного прийому. Визначені невідповідності дозволили сформувати нове наукове завдання дослідження та обґрунтувати мету даної роботи.

Теоретичний матеріал

Модель оцінки впливу мультипликативної завади на імовірність бітової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Модель сигнал з БФМ на i – тому тактовому тактовому інтервалі T подано в вигляді одного з M можливих значень [2,3]:

$$S_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_c); \tag{1}$$

де $\varphi_i = \frac{i2\pi}{M}$, $t \in [0, T_s]$, $i = 0, 1, \dots, M - 1$.

ω_0 – несуча частота; φ_i – інформаційна фаза;

$A_0 = \sqrt{2E_s/T_s}$ – амплітуда сигналу.

$E_s = k E_b$ – енергія каналного символу, що несе інформацію про $k = \log_2 M$ інформаційних біт;

E_b – енергія, яку має один біт інформації;

φ_c – початкове фазове зміщення сигнального сузір'я.

Математична модель процесу прийому змішаного вхідного сигналу на вході ТКМ при сформованій мультипликативній заваді подаємо в вигляді (2) [8, 9]:

$$S_j(t) = \mu(t) A_0 \cos[(\omega_0 t + \omega_i + \omega_p)], \varphi_i = \frac{i2\pi}{N}, t \in 0, 1 \dots M - 1. \tag{2}$$

де $\mu(t)$ – амплітудний множник, що описується законом розподілу Райса [1, 8].

Математична модель класичного кореляційного когерентного прийому сигналу з БФМ виду (1) під впливом білого гаусівського шуму реалізується на основі обчислення інтегралів згортки I коливань вхідного сигналу $x(t)$ та M опорних сигналів [4,9]:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \cdot \int_0^T x(t) \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}\right) dt. \tag{3}$$

Процес $x(t)$, що входить до (3), має вигляд:

$$x(t) = s_1(t) + n(t),$$

де $n(t)$ – складова мультипликативної завади

При фіксації початкової фази φ_n вектору завади $s_n(t)$ сумарний вектор $s_i(t) + s_n(t)$ можна прийняти умовно детермінованим, а процеси I_i на виходах кореляторів демодулятора будуть випадковими. За рахунок гаусівського шуму вони розподілені за нормальним законом розподілу. Статистичні характеристики таких розподілень можна визначити за початковою фазою завади φ_n .

А саме, середні значення m_0 m_i m_{M-1} , дисперсії D_0 D_i D_{M-1} , взаємні кореляційні моменти M_{0-1} , а також характеристики процесів $y = I_0 - I_1$ на вході пристрою порівняння кореляційних інтегралів [10, 12]:

$$m_{0-i} = \langle y_{0-i} \rangle = \langle I_0 \rangle - \langle I_i \rangle = m_0 - m_i \tag{4}$$

та

$$D_{0-i} = D_0 + D_i - 2M_{0-i} \tag{5}$$

При фіксації величини μ і φ розрахуємо значення змінних, що входять до (4) та (5), з урахуванням (1), (2), (3).

Середні значення:

$$\begin{aligned} m_0 &= \langle I_0 \rangle = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^T \langle x(t) \rangle \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt = \\ &= \frac{2A_0}{N_0} \int_0^T \langle s_0(t) + n(t) \rangle \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2\mu A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) \rangle \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt + \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle n(t) \rangle \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt = \\
&= \frac{2\mu A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt + 0 = \frac{2\mu A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi) dt = \frac{2\mu E_s}{N_0}; \\
m_i = \langle I_0 \rangle &= \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}\right) dt = \\
&= \frac{2A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}\right) dt = \\
&= \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) \rangle \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}\right) dt + \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle n(t) \rangle \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}\right) dt = \\
&= \frac{2\mu A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi) \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}\right) dt + 0 = \\
&= \frac{2\mu A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi) \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}\right) dt = \frac{2\mu E_s}{N_0} \cos\left(\varphi_0 + \varphi - \frac{i2\pi}{M}\right).
\end{aligned}$$

Розрахунки показали, що середні значення m_{0-i} визначаються наступним чином:

$$m_{0-i} = \frac{2\mu E_s}{N_0} \left[1 - \cos\left(\varphi_0 + \varphi - \frac{i2\pi}{M}\right) \right].$$

Дисперсія визначається по виразу:

$$D_{0-i} = \frac{4E_s}{N_0} \left[1 - \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M}\right) \right].$$

Якщо для спрощення розрахунків врахувати, що $\varphi_0 = 0$, то

$$m_{0-i} = \frac{2\mu E_s}{N_0} \left[1 - \cos\left(\varphi - \frac{i2\pi}{M}\right) \right],$$

$$D_{0-i} = \frac{4E_s}{N_0} \left(1 - \cos\frac{i2\pi}{M} \right).$$

Після проведення цих розрахунків нескладно визначити також умовні ймовірності помилки, наприклад, по параметру φ_n , що входять до виразу (3).

Прийmemo імовірність помилки сигналу БФМ за наступним виразом [9, 12, 13]:

$$p_i(I_0 > I_i) \Big|_0 = 1 - \Phi\left(\frac{m_{0-i}}{\sqrt{D_{0-i}}}\right). \quad (6)$$

Для випадку впливу мультиплікативної завади імовірність (6) визначимо за наступним виразом [9, 12, 13]:

$$\begin{aligned}
p_i(I_0 > I_i) \Big|_0 &= 1 - \Phi\left\{ \frac{\left[\frac{2\mu E_s}{N_0} \left[1 - \cos\left(\varphi - \frac{i2\pi}{M}\right) \right] \right]}{\sqrt{\frac{4E_s}{N_0} \left(1 - \cos\frac{i2\pi}{M} \right)}} \right\} = \\
&= 1 - \Phi\left\{ \mu \left[1 - \cos\left(\varphi - \frac{i2\pi}{M}\right) \right] \sqrt{\frac{\frac{E_s}{N_0}}{\left(1 - \cos\frac{i2\pi}{M} \right)}} \right\}.
\end{aligned}$$

Для усереднення ймовірності бітової помилки за випадковими параметрами μ і φ був

використаний метод Монте-Карло [9, 15].

Результати та дискусія

Оцінка впливу мультиплікативної завади на імовірність бітової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Розрахуємо та відобразим в графічному вигляді залежність ймовірності бітової помилки P_{eb} від відношення сигнал/шум (ВСШ) $\frac{E_b}{N_0}$ для $M = 2, 4, 8, 16$ та 32 при різних параметрах інтенсивності мультиплікативних завад [16, 17].

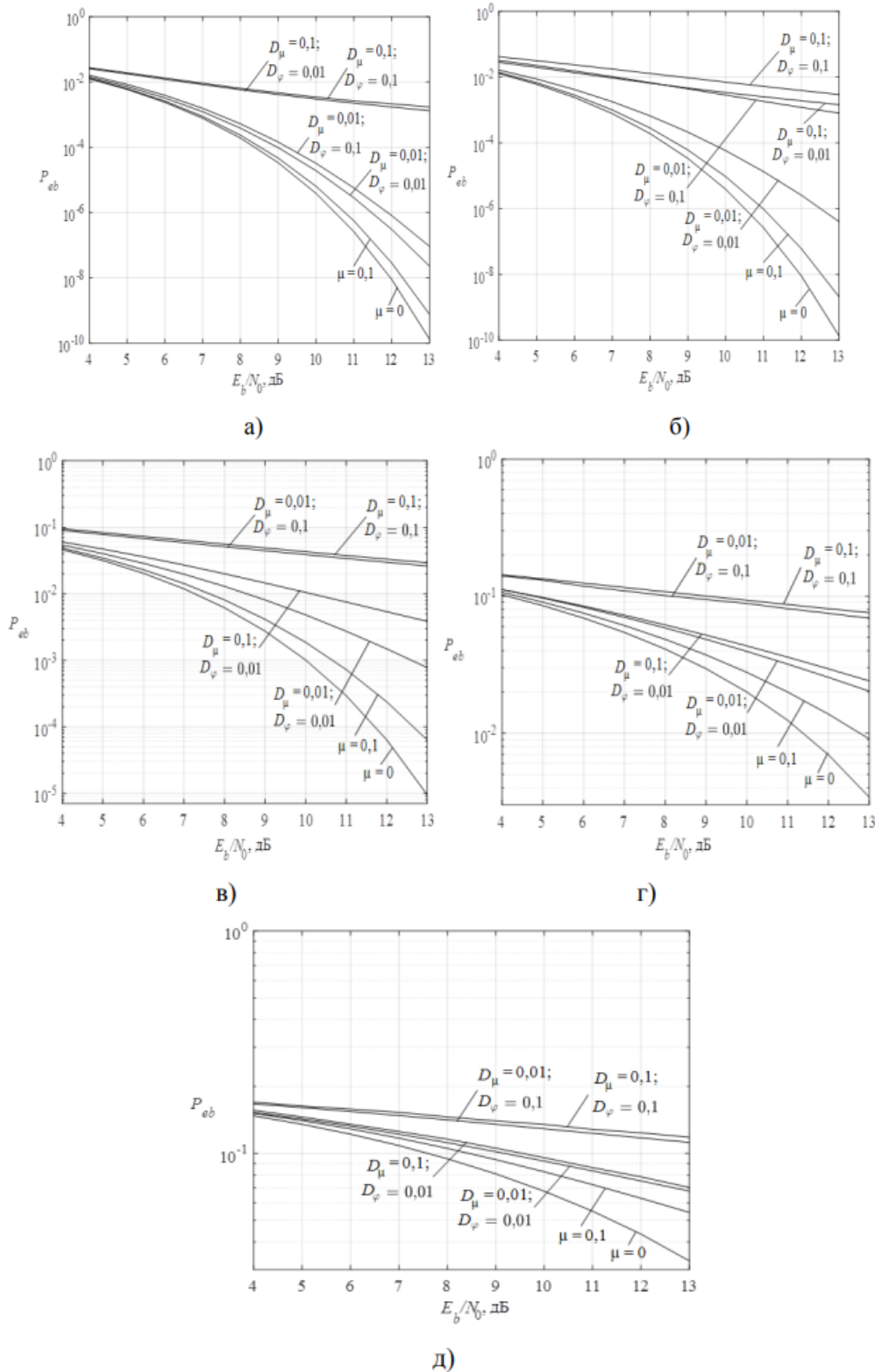


Рис.1. Залежність ймовірності помилки P_{eb} від ВСШ $\frac{E_b}{N_0}$ для сигналів БФМ за наявності мультиплікативної завади: а) 2-ФМ; б) 4-ФМ; в) 8-ФМ; г) 16-ФМ; д) - 32-ФМ

Висновки

На рис.1 наведено розраховані залежності ймовірності бітової помилки при інтенсивності ретрансльованої завади $\mu = 0.1$, середньому значенні рівня сигналу при райсівських завмираннях $m_\mu=1$, дисперсіях амплітудних завмирань $D_\mu = 0.01$ та фази $D_\varphi = 0.1$.

В разі мультиплікативної завади під величиною E_b розуміється середня енергія завмираючого сигналу [18].

Для порівняння наведено залежність завадостійкості прийому сигналів БФМ тільки відносно до білого гаусівського шуму ($\mu = 0$).

Аналіз поданих на рис.1 залежностей дозволяє зробити висновок про те, мультиплікативна завада з відносним середнім значенням інтенсивності $\mu = 0.1$ [19, 20], дисперсією амплітуди 0,01 та дисперсією фази 0,01 рад² для 2-ФМ та 4-ФМ дає при ймовірності бітової помилки $P_{eb} = 10^{-3}$ погіршення ВСШ від 0,3 до 1 дБ, а для 8-ФМ та 16-ФМ це погіршення може становити від 2,5 та 5 дБ, відповідно.

При збільшенні дисперсії флуктуацій негативна дія мультиплікативної завади значно зростає. У райсівському каналі на завадостійкість прийому сигналів з малою позиційністю ($M < 8$) більш істотний вплив мають флуктуації амплітуди, ніж фази. При $M > 8$ вплив фазових флуктуацій на значення ймовірності помилки суттєво зростає.

В статі вирішується нове актуальне наукове завдання щодо оцінки впливу мультиплікативної завади на завадозахищеність когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

1. Розроблено та подано модель оцінки впливу мультиплікативної завади на ймовірність бітової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Подана модель основана на ймовірнісних характеристиках появи символної та бітової помилки сигналу з багатопозиційною фазовою модуляцією відносно прийнятого рівня інтенсивності мультиплікативної завади для різних значень співвідношень сигнал/шум на вході когерентного приймача.

2. Результати оцінки ймовірність бітової помилки когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією при наявності в складі вхідного сигналу мультиплікативної завади показали наступне:

Мультиплікативна завада з відносним середнім значенням інтенсивності $\mu = 0.1$, дисперсією амплітуди 0,01 та дисперсією фази 0,01 рад² для 2-ФМ та 4-ФМ дає при ймовірності бітової помилки $P_{eb} = 10^{-3}$ погіршення співвідношення сигнал/шум від 0,3 до 1 дБ. Для сигналів з 8-ФМ та 16-ФМ це погіршення може становити від 2,5 та 5 дБ, відповідно.

При збільшенні дисперсії флуктуацій негативна дія мультиплікативної завади значно зростає.

У райсівському каналі на завадостійкість прийому сигналів з малою позиційністю ($M < 8$) більш істотний вплив мають флуктуації амплітуди, ніж фази. При $M > 8$ вплив фазових флуктуацій на значення ймовірності помилки суттєво зростає.

Література

1. Балашов В. О. Системи передавання широкосмуговими сигналами / В. О. Балашов, П. П. Воробієнко, Л. М. Ляховецький, В. В. Педяш. - Одеса: Вид. центр ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. - 336 с.
2. Kalantaievska S. Development of a complex mathematical model of the state of a channel of multi-antenna radio communication systems /S. Kalantaievska, O. Kuvshynov, A. Shyshatskyi, O. Salnikova, Y. Punda, P. Zhuk, O. Zhuk, H. Drobakha, L. Shabanova-Kushnarenko, S. Petruk //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. - № 3. – P. 21-30, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166994>.
3. Зайцев С.В. Математична модель каналу зв'язку з сигналами OFDM та навмисними завадами /С.В. Зайцев //Математичні машини і системи. – 2011. - № 4. – С. 166–175, <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/83639>.
4. Швець В. Оцінка завадозахищеності когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією при наявності нефлуктуаційних завад /В. Швець, Т. Мелешко //Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. - № 2. – С. 167–178, <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-21>.
5. Mohamad M. Transmitter Architecture for Spectrally-Precoded OFDM /M. Mohamad, R. Nilsson, A. De Beek, V-J. Novel //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2018. – Vol. 65(8). - P. 2592-2605.
6. Beek J. OFDM Spectral Precoding with Protected Subcarriers /J. Beek //IEEE Communications Letters. – 2013. – Vol. 17(12). - P. 2209-2212.
7. Кадет Н.П. Оцінка впливу навмисних завад на системи радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти /Н.П. Кадет, А.В. Шишацький, В.В. Лютов, М.В. Зірка //Проблеми інформатизації та управління. – 2015. - № 4(52). - С. 37–44, <https://doi.org/10.18372/2073-4751.4.10334>.
8. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку /В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, Є.В. Кільчицький. - Київ: Техніка, 2004. - 576 с.
9. Туровський О.Л. Методологія оцінки впливу нефлуктуаційних завад на завадостійкість прийому дискретних сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією / О.Л. Туровський, Т.В. Мелешко, В.О. Дробик //Зв'язок. – 2022. - № 5 (159). - С.45–52.
10. Hwang W. Performance analysis of OFDM on the shadowed multipath channels / W. Hwang, K. Kim //IEEE Transactions on Consumer Electronics, IEEE. – 1998. – Vol. 44, no.4. – P. 1323-1328.
11. Палагин В. В. Модели и методы обработки сигналов при взаимодействии с коррелированными негауссовскими помехами /В. В. Палагин //Электронное моделирование. – 2015. - № 37(6). - С. 19–34.

12. Прокоф'єв М. Оцінювання коефіцієнта якості шумової завади в системах активного захисту інформації / М. Прокоф'єв, В. Куліш, М. Вашченко, В. Дворський та інші. //Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2015. - вип. 1 (29). - С. 11-20.
13. Приходько С. І. Основи теорії інформації та кодування /С. І. Приходько, К. А. Трубочанінова, О. П. Батаєв. - Харків: УкрДУЗТ, 2017. - 109 с.
14. Науково-прикладні питання забезпечення роздільної здатності і ефективності обробки сигналів у радіотехнічних та телекомунікаційних системах за наявності завод : монографія / Ю. М. Бойко, О. М. Шинкарук, Л. В. Карпова, І. І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 218 с.
15. Палагін В.В. Комп'ютерне моделювання системи обробки шумових сигналів на фоні негаусових завод /В.В. Палагін, О.А. Палагіна, О.С. Зорін //Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. пр. – 2017. - Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, вип. 16. - С. 104-113.
16. Pyatin I. Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio /I. Pyatin, J. Boiko, O. Eromenko, I. Parkhomey //TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). – 2023. – Т. 21. – №. 3. – С. 496-505.
17. Boiko J. Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications /J. Boiko, V Tolubko, O Barabash, O Eromenko, Y Havrylko // TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). –2019. –Т. 17. –№.4. – С. 2025-2038.
18. Boiko J. Study of the influence of changing signal propagation conditions in the communication channel on bit error rate /J. Boiko, I Pyatin, L Karpova, O Eromenko //Data-Centric Business and Applications: ICT Systems—Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity. –Cham : Springer International Publishing, 2021. –С. 79-103.
19. Бойко Ю. М. Підвищення заводостійкості блоків оброблення сигналів супутникових засобів телекомунікацій на основі модифікованих схем синхронізації /Ю. М. Бойко //Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. – №. 61. – С. 91-107.
20. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення заводостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завод : монографія /Ю.М.Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толюпа. – Київ : Логос, 2018. –227 с.

References

1. Balashov V. O. Broadband signal transmission systems /V. O. Balashov, P. P. Vorobienko, L. M. Lyakhovetskiy, V. V. Pedyash. - Odesa: Ed. ONAZ center named after O.S. Popova, 2012. - 336 p.
2. Kalantaievska S. Development of a complex mathematical model of the state of a channel of multi-antenna radio communication systems /S. Kalantaievska, O. Kuvshynov, A. Shyshatskiy, O. Salnikova, Y. Punda, P. Zhuk, O. Zhuk, H. Drobakha, L. Shabanova-Kushnarenko, S. Petruk //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. - №. 3. – P. 21-30, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166994>.
3. Zaitsev S.V. A mathematical model of a communication channel with OFDM signals and intentional interference /S.V. Zaitsev //Mathematical machines and systems. - 2011. - №4. – P.166–175, <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/83639>.
4. Shvets V. Evaluation of the predation protection of coherent signal reception with a rich positional phase manipulation with the presence of non-fluctuating predispositions /V. Shvets, T. Meleshko //Measuring and computing devices in technological processes. – 2023. - №2. – P. 167–178, <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-21>.
5. Mohamad M. Transmitter Architecture for Spectrally-Precoded OFDM /M. Mohamad, R. Nilsson, A. De Beek, V-J. Novel //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2018. – Vol. 65(8). - P. 2592-2605.
6. Beek J. OFDM Spectral Precoding with Protected Subcarriers /J. Beek //IEEE Communications Letters. – 2013. – Vol. 17(12). - P. 2209-2212.
7. Cadet N.P. Assessment of the influence of intentional interference on the radio communication system with pseudorandom rearrangement of the operating frequency /N.P. Cadet, A.V. Shishatskiy, V.V. Lyutov, M.V. Zirka //Problems of informatization and management. – 2015. № 4(52). - P. 37–44, <https://doi.org/10.18372/2073-4751.4.10334>.
8. Steklov V.K. Optimization and modeling of communication devices and systems /V.K. Steklov, L.N. Berkman, E.V. Kilchitskiy. - Kyiv: Technika, 2004. - 576 p.
9. Turovskiy O.L. Metodolohiia otsinky vplyvu neflukuatsiinykh zavod na zavodostiikist pryimou dyskretnykh syhnaliv z bahatopozytysinoiu fazovoiu manipuliatsiieiu /O.L. Turovskiy, T.V. Meleshko, V.O. Drobyk //Zviazok. – 2022. - № 5 (159). - S.45–52.
10. Hwang W. Performance analysis of OFDM on the shadowed multipath channels / W. Hwang, K. Kim //IEEE Transactions on Consumer Electronics, IEEE. – 1998. – Vol. 44, no.4. – P. 1323-1328.
11. Palagin V.V. Models and methods of signal processing when interacting with correlated non-Gaussian noise /V.V. Palagin //Electronic modeling. – 2015. - №37(6). - P. 19–34.
12. Prokofiev M. Dvorsky and others. Evaluation of the quality coefficient of noise interference in active information protection systems /M. Prokofiev, V. Kulish, M. Vashchenko, V. Dvorsky and others. //Legal, regulatory and metrological support of the information protection system in Ukraine. – 2015. vol. 1 (29). - P. 11-20.
13. Prykhodko S. I. Fundamentals of information theory and coding /S. I. Prykhodko, K. A. Trubchaninova, O. P. Bataev. - Kharkiv: UkrDUZT, 2017. - 109 p.
14. Naukovo-prykladni pytannja zabezpechennja rozdilnoji zdatnosti i efektyvnosti obrobky syhnaliv u radiotekhnichnykh ta telekomunikacijnykh systemakh za najavnosti zavod /J. Boiko, O. Shynkaruk, L. Karpova, I. Chesanovskiy. – Khmelnytskyi : KhNU, 2019. – 218 s.
15. Palagin V.V. Computer modeling of the noise signal processing system against the background of non-Gaussian disturbances /V.V. Palagin, O.A. Palagina, O.S. Zorin //Mathematical and computer modeling. Series: Technical sciences: coll. of science Kamianets-Podilsk Ave. national University. – 2017. - Vol. 16. - P. 104-113.
16. Pyatin I. Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio /I. Pyatin, J. Boiko, O. Eromenko, I. Parkhomey //TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). – 2023. – Т. 21. – №. 3. – С. 496-505.
17. Boiko J. Signal processing with frequency and phase shift keying modulation in telecommunications /J. Boiko, V Tolubko, O Barabash, O Eromenko, Y Havrylko //TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). –2019. –Т. 17. –№.4. – С. 2025-2038.
18. Boiko J. Study of the influence of changing signal propagation conditions in the communication channel on bit error rate /J. Boiko, I Pyatin, L Karpova, O Eromenko //Data-Centric Business and Applications: ICT Systems—Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity. –Cham : Springer International Publishing, 2021. –С. 79-103.
19. Boiko J. M. Increasing the noise immunity of signal processing units of telecommunications on the basis of the modified synchronization schemes /J. M. Boiko //Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaпаратobuduvannia. – 2015. - №61. - P. 91–107.
20. Boiko J.M. Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavodostiikosti y efektyvnosti obrobkysyhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiakh ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavod: monohrafiia /J. M. Boiko, V. A. Druzhynin, S. V. Toliupa. -Kyiv: Lohos, 2018. - 227 s.