

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ РАДІОЛІНІЙ ІЗ СКЛАДНИМИ СИГНАЛАМИ ПРИ МАЖОРИТАРНОМУ КОДУВАННІ

Запропоновано модель приймача складних дискретних частотно-фазоманіпульованих сигналів (ДЧФМС), яка завдяки раціональному вибору параметрів складових частин пристрою обробки та застосуванню мажоритарного кодування забезпечує підвищення завадозахищеності радіоліній засобів зв'язку. В статті виконано раціональний вибір місця застосування кодування складених структур модемів, отримано вирази для оцінки імовірності помилки ДЧФМС при застосуванні мажоритарного кодування проміжних складених структур сигналів, таких як дискретні фазоманіпульовані сигнали (ДФМС). Їхній аналіз дозволяє по-перше визначити додатковий рівень підвищення завадостійкості сигналу, за рахунок раціоналізації кількості обладнання і місця використання мажоритарного кодування, а по-друге визначити зв'язок параметрів складових частин складеного сигналу для удосконалення режиму адаптації до умов змінної дії завад.

Ключові слова: частотно-фазоманіпульовані сигнали, мажоритарне кодування, завадостійкість сигналу.

Вступ. Для забезпечення ефективного функціонування радіоліній в умовах дії потужних завад в сучасних засобах зв'язку все частіше використовують складні сигнали [1]. При значному енергетичному перевищенні завадою таких сигналів отримати задану вірність прийому можливо завдяки вдалому вибору виду складного сигналу, його параметрів та передусім підвищенню значення бази сигналів B_c . Аналіз способів боротьби з потужними завадами [2] вказує на необхідність застосування складних сигналів із $B_c=10^7\dots 10^8$ одиниць. Але подальшому збільшенню B_c перешкоджають обмеження. По-перше це обмеження смуги частот виділеної системі зв'язку в якій цей засіб працює. По-друге обмеження пов'язане з постійним намаганням підвищувати пропускну здатність системи зв'язку і, відповідно, швидкість обміну інформаційними повідомленнями. Та головне обмеження постає через труднощі в реалізації пристрою обробки (ПО) складного сигналу, які зростають пропорційно до збільшення B_c .

Скориставшись особливостями видів складного сигналу таких як дискретні частотноманіпульовані сигнали (ДЧМС) і дискретні фазоманіпульовані сигнали (ДФМС) за рахунок поєднання їх переваг у боротьбі із діючими та визначеними типами завадами та прихованості передавання доцільне використання складених дискретних частотно-фазоманіпульованих сигналів (ДЧФМС). Використання складеної структури сигналу дозволяє покращити адаптованість засобу зв'язку до завадової обстановки зміною значень баз складових частин при загальній фіксованій B_c . До того ж застосуванням складовою структурою можливо досягти істотного спрощення в реалізації ПО сигналів. У разі коли бази розподілені не пропорційно, наприклад для ДЧМС – 10^2 , а для ДФМС – 10^6 , то для ПО другого ступеня можна з метою його спрощення можна також використати принцип складеності, тобто складені ДФМС. Як з'ясувалось найбільший вигравш щодо співвідношенні ускладненість–ефективність забезпечують [3] саме складові структури ДФМС. При цьому їхня ефективність їх залишається пропорційною до розміру B_c , а спрощення підвищується на три–чотири порядки. Річ у тім, що база складеного сигналу (СС) дорівнює добутку баз B_n несучої та B_m моделюючої послідовностей, які формують сигнал. Через це база кожної складової на три–чотири порядки менша за кількість елементів, що накопичуються, наприклад у регістрах зсуву (РЗ) пристроїв їх обробки. Утім далі підвищувати (більш двох) чисельність ступенів обробки сенсу немає, оскільки це призводитиме до погіршення кореляційних властивостей складеного сигналу [4].

Варто зазначити, що використання складених структурних крім спрощення ПО забезпечує й додаткові переваги, поліпшуючи, наприклад, режим адаптації засобу зв'язку до змінюваних параметрів та видів завад, які діють на нього. Ще більші переваги досягають використанням не тільки СС, а додатковою зміною виду сигналу - використанням в першому ступені пристрою обробки ДЧМС. В цьому випадку сигнал засобу стає сигналом підвищеної енергетичної прихованості, що змінює миттєво частоту випромінювання f_i з ансамблю $N_f = \{1, f_n\}$.

Застосування ДЧФМС за попередньо проведеним параметричним синтезом їх параметрів на максимально досягнуту в реалізації B_c знижує ефективність навмисних завад, але не гарантує усунення їх впливу до рівня забезпечення заданої вірності обміну повідомленнями. Детальний аналіз ефективності використання ДЧФМС проведений в [5], де отримані не тільки аналітичні вирази для визначення імовірності помилки сигналу в умовах найгірших завад і надані рекомендації для проведення параметричного синтезу параметрів складного сигналу, але отримані і чисельні характеристики рівня завад, що заважають роботі системи зв'язку. Їх аналіз дозволяє зробити висновки, що при обмеженій B_c рівень завадозахисту сучасних засобів зв'язку не має достатнього запасу вірності приймання інформаційних повідомлень на окремі умови дій завад, особливо при комплексному впливі навмисних та ненавмисних енергетично потужних завад. Тому пошук і аналіз напрямків дій по удосконаленню засобів особливо їх ПО, що направлені на підвищення їх завадозахищеності без суттєвих додаткових енергетичних витрат є актуальним.

Постановка задачі. Так як підвищення структурної ефективності сигналів, пов'язане із переобладнанням блоків їх формування і обробки, менш затратне, бо слабо впливає на енергетичну компоненту і відповідно не потребує кардинальної зміни характеристик енергетичних блоків засобу зв'язку, то цей напрямок удосконалення раціональний. Реєстрація помилкового рішення при прийманні елементу складного сигналу виникає у вирішальному пристрої ПО, що і впливає на значення імовірності помилки Q_n . Якщо вибором виду сигналу, параметричним синтезом його параметрів рівень завадозахищеності радіолінії не досягнуто, то необхідно застосовувати додаткові міри та засоби – такі, як кодування і реалізуючи їх декодери. Застосування мажоритарного кодування СС один з напрямків, що повинен покращити завадозахищеність засобу зв'язку і потребує дослідження і підтвердження методом порівняння значень Q_n для СС із кодуванням та без.

Тому метою статті є отримання виразів для оцінки імовірності помилки ДЧФМС при застосуванні мажоритарного кодування проміжних структур (ДФМС), аналіз якої дозволить по-перше визначити додатковий рівень підвищення завадостійкості сигналу, що очікується, а по-друге визначити його зв'язок з параметрами ДФМС та ДЧМС для удосконалення режиму адаптації до умов дії завад. Так як і в [5] доцільно скористатися ітераційним методом аналізу за рахунок поступової зміни оцінки вхідних умов, тобто їх уточнення, до найгіршого стану - значного енергетичного перевищення завадою сигналу як для окремих частин так і для ПО в цілому. Наслідком протидії впливу завад є часткова зміна параметрів СС сигналу, що в свою чергу потребує застосування методів математичного моделювання тієї частини обладнання засобу зв'язку, що змінюється найбільш.

Основна частина. На початковому етапі аналізу необхідно визначитись із сутністю мажоритарного кодування та місцем його використання в ПО складених ДЧФМС для підвищення завадозахищеності радіолінії, узявши до уваги простоту реалізації ПО зазначеного сигналу.

Сутність методу мажоритарного кодування полягає в наступному. Кожне повідомлення обмеженої довжини (або структурна послідовність складової частини сигналу) передається кілька разів, частіше всього - три рази. Оброблені повідомлення запам'ятовуються, а потім проводиться їхнє порозрядне порівняння. Судження про правильність прийому виносяться за збігом більшості з кількості прийнятих копій сигналу методом «два з трьох». При мажоритарному декодуванні для кожного інформаційного символу формується непарне

число оцінок шляхом додавання по модулю 2 певних комбінацій символів прийнятого коду у вирішальному пристрої. Рішення про справжнє значення прийнятого символу приймається за мажоритарним принципом, тобто якщо більша кількість оцінок дорівнює 1, то приймається саме таке рішення [6]. Застосування мажоритарного кодування для ДЧФМС потребує використання складової структури моделі ПО і відповідно визначення місця його застосування. Оскільки стрибки по частоті для ДЧМС пов'язані не тільки із зміною параметрів складеного сигналу на який впливає завада, а і на втрати при розповсюдженні (зміна частоти), появу додаткових демаскуючих ознак за рахунок виникнення періодичності (циклу при повторі), що завідома зменшує заводозахист засобу, то місцем використання кодування обрано першу ступень складеного ДФМС. Тоді модель приймача ДЧФМС з мажоритарним декодуванням першого ступеня складеного ДФМС може мати вигляд рис. 1.

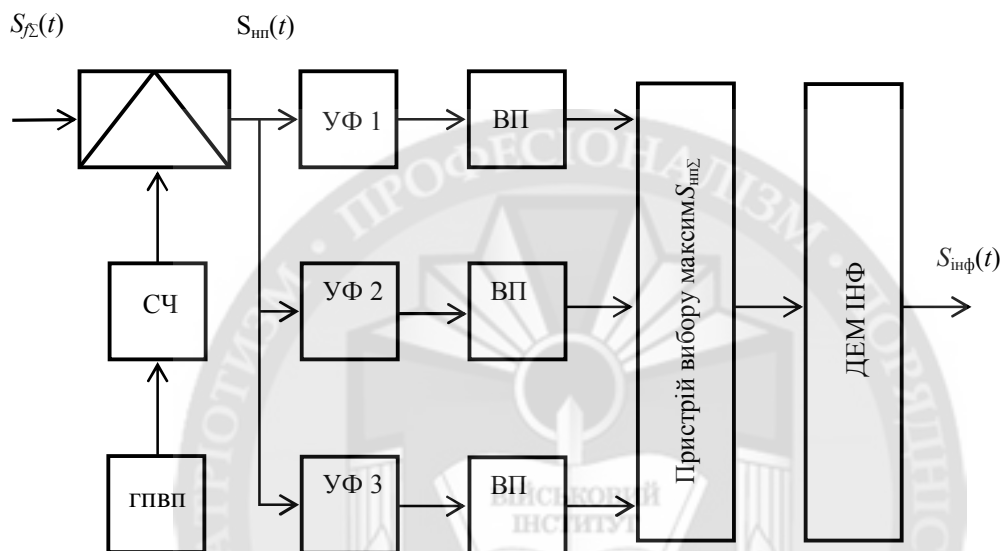


Рис. 1. Модель приймача ДЧФМС з мажоритарним декодуванням першого ступеня складеного ДФМС

При обробці ДЧФМС на прийняття рішення про правильність приймання біта сигналу впливає кожне значення елемента несучої послідовності (НП) складеного ДФМС, що отримане в результаті демодуляції ДЧМС. Сутність мажоритарного декодування для ДЧФМС полягає в визначенні функції правдоподібності, що виявляється за сукупністю значень елементів НП всіх дозволених кодових комбінацій. При мажоритарному декодуванні дозволеними є всі комбінації, а для прийняття правильного рішення про інформаційний сигнал більше половини елементів N_e повинні бути прийняті безпомилково. А так як при цьому кожна НП передається на окремій частотній позиції, то цим і досягається підвищення заводозахищеності радіолінії при дій найнебезпечній [5] багаточастотній заваді. Тому для визначення Q_{Π} при прийманні ДЧФМС з мажоритарним кодуванням скористаємось виразами з [5] із подальшим уточненням ймовірності помилки від сумісного впливу шуму і завади P_{Σ} :

$$Q_{\Pi}(P_{\Sigma}) = \sum_{m=0}^{N_e} Q_{\Pi m} Q_{\Pi m} \quad (1)$$

де $Q_{\Pi m}$ – ймовірність поразки заводою m елементів сигналу з N_e , що дорівнює базі першої складової фазоманіпульованого сигналу і використовуються для передавання елемента моделюючої послідовності (МП) складеного ДФМС;

$Q_{\Pi m}$ – ймовірність помилки в прийманні сигналу, m частот якого вражені заводою.

Якщо обирати N_e непарним та скористатися схемою послідовності незалежних випробувань [6], то ймовірність – $Q_{\text{пм}}$ для ДЧФМС:

$$Q_{\text{пм}} = \sum_{k=\frac{N_e+1}{2}}^{N_e} Q_{\text{пм}k}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{пм}k}$ – ймовірність помилкового прийому « k » елементів з N_e .

З метою визначення $Q_{\text{пм}k}$ потрібно оцінити ймовірність помилкового прийому кожного елемента НП кожним з УФ (рис. 1) на вхід якого потрапила завада. При цьому слід рахувати, що не всі елементи НП потрапивши на вхід УФ спільно з завадою, прийняті невірно, а серед k помилково прийнятих елементів, j -я частина прийнята помилково через вплив завади спільно з шумом, а $k-j$ під впливом тільки шуму. Використовуючи елементи комбінаторики отримуємо наступне. Якщо тільки j елементів НП прийняті невірно, при багаточастотній заваді на m - частотних позиція сигналу, то число поєднань подій, що полягають у помилковому прийомі елементів сигналу при дії шуму і завади дорівнює C_m^j . Відповідно число поєднань, події в яких помилкове прийняття елемента є слідством впливу тільки шуму, визначається як $C_{N_e-m}^{k-j}$. Тоді ймовірність помилкового приймання k елементів із N_e :

$$Q_{\text{пм}k} = \sum_{j=0}^k C_m^j C_{N_e-m}^{k-j} Q_{\text{пм}kj}. \quad (3)$$

Повну ймовірність $Q_{\text{пм}kj}$ помилкового прийому в (3) можна представити так:

$$Q_{\text{пм}kj} = Q_1^j (1-Q_1)^{m-j} Q_2^{k-j} (1-Q_2)^{N_e-m-k+j}, \quad (4)$$

де Q_1, Q_2 – ймовірності помилкового прийому елемента НП при спільній дії шуму і завади і тільки шуму відповідно, які повинні враховувати розподілення енергії сигналу E_c на кожний елемент НП та визначаються наступними виразами:

$$Q_1 = 1 - F \left[\left(\frac{B_c}{2Ch^2_{\text{птр}}} + \frac{2^{P_s/P_c} k B_c}{2n \cdot N_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (5)$$

$$Q_2 = 1 - F \left(\sqrt{\frac{2Ch^2_{\text{птр}}}{N_e}} \right), \quad (6)$$

де P_s, P_c – потужності завади і сигналу відповідно;

C – запас на шум у відношенні сигнал-шум;

$h^2_{\text{птр}}$ – відношення енергії сигналу ДФМС до спектральної щільності завади при якому досягається вірність, що потребується.

З урахуванням цього остаточно ймовірність помилкового прийому ДЧФМС з мажоритарним кодуванням має вигляд:

$$Q_{\text{п}}(P_{\Sigma}) = \sum_{m=0}^{N_e} \left[C_{N_e}^m \left(\frac{n}{M_f} \right)^m \left(1 - \frac{n}{M_f} \right)^{N_e-j} \sum_{k=\frac{N_e+1}{2}}^{N_e} \sum_{j=0}^k C_m^j C_{N_e-m}^{k-j} Q_1^j (1-Q_1)^{m-j} Q_2^{k-j} (1-Q_2)^{N_e-m-k+j} \right]. \quad (7)$$

Аналіз цього виразу свідчить, що знаходження $Q_{\text{п}}$ трудомісткий процес, що потребує перебору великої кількості комбінацій і обліку багатьох доданків, а з пошуком $\left(\frac{n}{M_f} \right)_{\text{нп}}$ –

він стає ще й багатократним. Тому розрахунок $Q_{\Sigma}(P_{\Sigma})$ за (7) доцільно виконувати при обмеженні вхідних параметрів ДЧФМС. Цікавість представляє: наскільки доцільне використання мажоритарного кодування; як воно залежить від зменшення вимог до вірності приймання повідомлення для одного типу сигналів. Такий підхід повинен визначити:

- чи доцільне ускладненням алгоритму роботи приймача ДЧФМС;
- які значення довжини НП забезпечують найбільшу завадостійкість сигналів в умовах навмисних завад;
- напрямком подальшого підвищення ефективності складних сигналів та спрощення реалізації пристроїв їхнього формування та обробки, тобто покращення співвідношення «витрати на реалізацію – досягнений ефект».

Розрахунки, що дозволили визначити завдяки (7) показник, який оцінює рівень впливу потужних завад $\eta = P_z/P_c$ при $Q_{\text{пз}}=10^{-5}$ та η' при $Q_{\text{пз}}=10^{-3}$ для змінних N_e та M_f , зведені до таблиці 1 та таблиці 2. Показник є визначним і за методикою викладеною у [8] дозволяє провести оцінку завадозахищеності ПО засобів зв'язку радіоліній.

Таблиця 1

Порівняння ефективності застосування мажоритарного кодування в приймачах ДЧФМС зі змінними параметрами M_f та N_e при $\Delta F=2$ ГГц; $R_{\text{інф}}=100$ біт/с; $h_2^2 = 20,739$; $C= 4,58$; $k=1$; $d=2$ (сигнал протилежний)

Таблиця 2

Порівняння ефективності застосування мажоритарного кодування в приймачах

M_f	$N_e=1$		$N_e=511$		$N_e=4095$		$N_e=16383$		$N_e=1597151$	
	η (дБ)	η' (дБ)	η	η'	η	η'	η	η'	η	η'
3	43,66	58,75	43,65	58,65	43,65	58,75	43,66	58,75	48,71	58,57
5	46,44	57,0	46,44	57,0	46,44	57,0	46,44	57,0	46,93	56,73
7	46,97	55,11	46,97	55,11	46,97	55,12	46,96	55,10	48,77	57,57
9	46,7	54,2	46,71	54,2	46,71	54,21	46,72	54,21	49,18	58,64

ДЧФМС зі змінними параметрами M_f та N_e

$\Delta F=2$ ГГц; $R_{\text{інф}}=100$ біт/с; $h_2^2 = 34,565$; $C= 7,63$; $k=1$; $d=2$

M_f	$N_e=1$		$N_e=511$		$N_e=4095$		$N_e=16383$		$N_e=1597151$	
	η (дБ)	η' (дБ)	η	η'	η	η (дБ)	η' (дБ)	η	η'	η
3	43,76	58,85	43,75	58,85	43,75	58,85	43,76	58,85	49,18	58,67
5	46,63	57,15	46,63	57,15	46,63	57,15	46,62	57,15	49,18	58,67
7	47,29	55,38	47,29	55,38	47,28	55,38	47,29	55,39	49,3	58,66
9	47,21	54,37	47,21	54,37	47,21	54,37	47,22	54,38	49,26	58,62

Їх аналіз показує, що за відсутності завад збільшувати енергетичний запас на шум недоцільно, тому що підвищенням S_v двічі забезпечується зростання η тільки на 0,3дБ. Це можна вважати похибкою розрахунків, або слідством відхилення закону розподілу шуму від нормального в смузі сигналу. При збільшенні M_f існує межа доцільності використання самого мажоритарного кодування, що вказує на необхідність пошуку раціональності в співвідношеннях N_e та M_f при обмеженій смузі системи зв'язку. Так, при змінні M_f від 3 до 5, η збільшується на 2,5дБ, а при зміні з 5 до 7 на 1,5 дБ, при $M_f \geq 7$, наприклад $M_f=9$ складає - 0,8дБ, що є витратним. Графіки залежності $Q_{\Pi}(P_{\Sigma})=f(\eta)$, які побудовані за результатами розрахунку (7) представлені на рис. 2. Аналіз графіків свідчить, що за умови вимоги, коли $Q_{\Pi} \leq 10^{-3}$ можна збільшити завадостійкість ДЧФМС на 1,5...2дБ, тобто використання мажоритарного кодування доцільне. Однак при $Q_{\Pi}(P_{\Sigma})=Q_{\Pi} \leq 10^{-5}$ сигнали із кодуванням програють сигналам без кодування 0,5...1дБ.

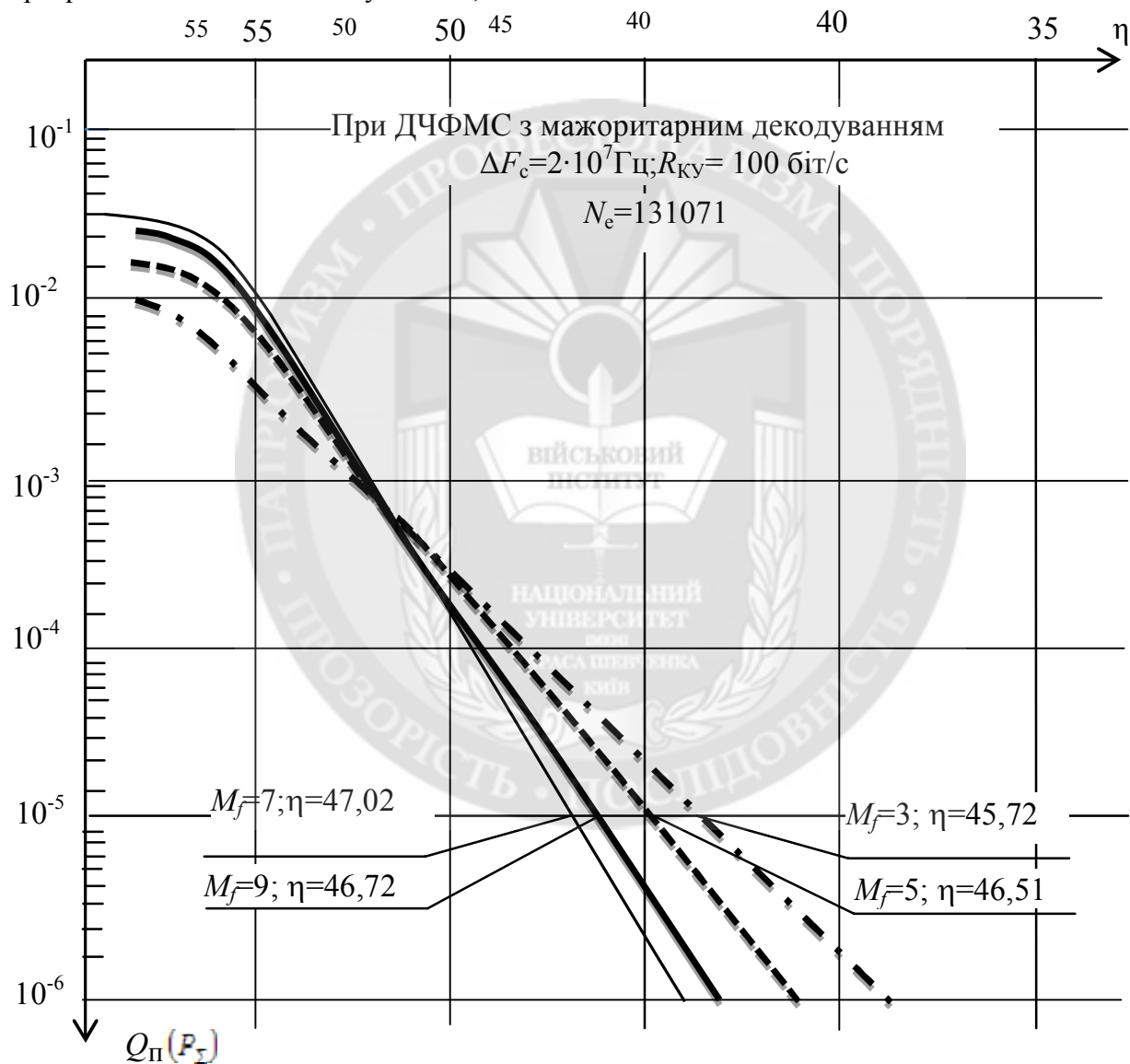


Рис. 2. Графіки залежності $Q_{\Pi} = f(\eta)$ для визначення η приймача ДЧФМС з мажоритарним декодуванням

Висновок. Таким чином, при дії потужних завад коли $\eta \geq 50$ дБ застосування ДЧФМС з мажоритарним кодуванням і реалізація пристроїв їхньої обробки можлива за умови коли вимога вірності передавання повідомлень визначається $-Q_{\Pi} \leq 10^{-3}$ є достатньою. У випадку, коли $\eta \leq 40-45$ дБ, що більш відповідає реальним умовам, доцільно використовувати ДЧФМС

без кодування з максимальною базою ДФМС. При збільшені η на порядок розв'язання проблеми забезпечення завадозахищеності радіолінії, що вимагається можливе тільки в енергетичний спосіб, тобто підвищенням потужності передавача засобу зв'язку.

Результати оцінювання ефективності мажоритарного кодування складеного сигналу на підставі визначення та порівняння значень $Q_{\Pi} = f(\eta)$, обчисленого згідно з (7) та допоміжними виразами (2), (3), (4) як і результати розрахунку η , свідчать про обмежену доцільність його використання, коли значення бази складових частин не перевищують порядок $10^2 \dots 10^3$ одиниць. Ускладнення ПО при значних B_c зростає не пропорційно до виграшу від застосування кодування і може стати збитковим. Таким чином раціональність використання мажоритарного кодування при зазначених обмеженнях параметрів складеного сигналу хоча і незначна - 1,5...2 дБ, та може бути вирішальною при активізації навмисних завод і достатньою для забезпечення необхідного рівня завадозахищеності засобів зв'язку радіоліній із складними сигналами.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Стеклов В.К. Теорія електричного зв'язку / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – К.: «Техніка», 2006. - 552 с.
2. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич.-М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 280 с.
3. Соловьев В.Р., Серых С.А., Соловьева М.В., Остапук А.И. Методика выбора составного фазоманипулированного ШПС для мобильных систем CDMA // Зв'язок. – 2003. – №2. – С.60-62.
4. В.Я.Кислов и др. Корреляционные свойства шумоподобных сигналов, генерируемых системами с динамическим хаосом. Радиотехника и электроника, 1997. – Том 42. – № 11. – С.1341-1349.
5. Серых С.О. Проблемы завадостійкості радіоліній з складними сигналами в умовах активних завод // Зв'язок. – 2013. - № 4, с .222
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. - М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.
7. Серых С.А. К вопросу о влияниях радиоэлектронных помех на современные и перспективные радиоэлектронные системы связи / С.А.Серых, В.Р.Соловьев, В.В. Богуш // Зв'язок,. № 2, 2008. - С. 69–73.
8. Серых С.О.Методика визначення показників ефективності модемів каналів керування телекомунікаційних засобів зв'язку // Наукові праці УНДІЗ. - 2014. - № 1. - С. 51-56.

Рецензент: д.т.н., проф. Жердев М.К., провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н. Кольцов Р.Ю., д.т.н., проф. Вишнеvский В.В., Серых С.А. ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОЛИНИЙ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ МАЖОРИТАРНОМ КОДИРОВАНИИ

Предложена модель приемника сложных дискретных частотно-фазоманипулированных сигналов (ДФМС), которая благодаря рациональному выбору параметров составных частей устройства обработки и применению мажоритарного кодирования обеспечивает повышение помехозащищенности радиолиний. В статье выполнен рациональный выбор места применения кодирования в составных структурах модемов, получены выражения для оценки вероятности ошибочного приема ДФМС при применении мажоритарного кодирования в промежуточных составных структурах сигналов, таких как дискретные фазоманипулированные сигналы (ДФМС). Их анализ позволяет: во-первых определить дополнительный уровень повышения помехоустойчивости сигнала, за счет рационализации выбора количества оборудования и места использования мажоритарного кодирования, а во-вторых определить связь параметров частей составного сигнала для усовершенствования режима адаптации в условиях изменяющегося действия помех.

Ключевые слова: частотно-фазоманипуляционные сигналы, мажоритарное кодирование, помехоустойчивость сигнала.

Ph.D. Koltcov R.Y., Prof. Vishnevsky V.V., Serikh S.A.
INCREASED NOISE IMMUNITY OF RADIO SIGNALS IN COMPLEX CODING
MAJORITARIAN

The proposed receiver model complex discrete-frequency phase-shift keyed signals (DFPS), which is due to the rational choice of component parameters, device processing and application of majority coding provides increased noise immunity of links. The article made a rational choice applications coding in the composite structures of the modems, the expressions for estimating the probability of erroneous reception DFPS when using the majority of the coding in the intermediate composite structures signals, such as discrete phasemanipulation signals (DPMS). Their analysis allows to: firstly to determine the additional level increase the noise immunity of the signal, due to the rationalization of the choice of the number of equipment and place of use the majority of the coding, and secondly to define the communication parameters of the parts of the composite signal to improve adaptation in a changing steps interference. A model of the receiver complex discrete frequency-phase-shift keyed signals which are due to a rational choice of the parameters of the components of the device processing and application of a majority of coding provides increased noise immunity of radio communications.

Keywords: *phase-shift keyed signals, majority of the coding coding, signal noise immunity.*