

УДК 621.391.1

А.Ф. Панов, к.т.н., доц.

В.Г. Ципоренко, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

Ю.В. Журавський, ад'юнкт

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Показана доцільність комплексного підходу до завадозахищеності цифрових систем радіозв'язку, при якому враховується завадозахищеність безпосередньо тих даних, які передаються споживачу, та завадозахищеність службових сигналів, що призначені для забезпечення правильної та узгодженої роботи передавача і приймача. Доведено, що службові сигнали цифрових систем радіозв'язку також переносять специфічну системоорганізуючу інформацію та наведено її кількісну оцінку.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Однією з тенденцій розвитку цифрових систем радіозв'язку (ЦСР) є забезпечення їх ефективності в умовах складної радіоелектронної обстановки, що зумовлено стрімким зростанням кількості радіоелектронних засобів у відносно сталому діапазоні робочих частот. Відповідно одним з основних показників ефективності ЦСР є завадозахищеність, яка залежить від багатьох факторів, в тому числі від принципів побудови ЦСР та специфіки її функціонування в складних умовах радіоелектронної обстановки. Точність аналізу завадозахищеності ЦСР істотно залежить від урахування впливу всіх факторів, що на неї впливають. Підвищення точності аналізу завадозахищеності ЦСР є підґрунтям для підвищення завадозахищеності та ефективності використання ЦСР, що є важливим практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми. Більшість робіт з ЦСР [1–4] зосереджені на аналізі завадозахищеності безпосередньо тільки тієї інформації, яка передається до споживача, яку в подальшому будемо називати споживацькою інформацією. При цьому питанням синхронізації та узгодженої роботи передавача та приймача ЦСР приділяється другорядне значення і вони розглядаються окремо від завадозахищеності споживацької інформації. Ряд робіт [5, 6] присвячені аналізу завадозахищеності процесів синхронізації систем радіозв'язку, але даний аналіз проведено окремо від завадозахищеності ЦСР в цілому. В [7] дано класифікацію сигналів ЦСР, за якою сигнали ЦСР розподіляються на два типи – інформаційні та службові. Інформаційні сигнали призначені безпосередньо для передачі споживацької інформації від її джерела до споживача. Усі інші сигнали є службовими і призначені для організації взаємоузгодженої роботи ЦСР як складної системи взаємопов'язаних елементів. Але аналіз завадозахищеності ЦСР в [7] здійснюється тільки за споживацькою інформацією. В [3, 7] досліджено вплив похибок символної синхронізації на правильність прийому споживацької інформації, але без врахування всіх інших типів службових сигналів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Невирішеною раніше частиною загальної проблеми аналізу завадозахищеності ЦСР є аналіз завадозахищеності з урахуванням впливу сукупності службових сигналів, які забезпечують правильну та взаємоузгоджену роботу передавача та приймача. Крім того, потребують уточнення методи аналізу інформаційних потоків ЦСР.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Відповідно до не вирішених раніше частин загальної проблеми аналізу завадозахищеності ЦСР, метою статті є:

- дослідження інформаційних потоків ЦСР з урахуванням службових сигналів;
- аналіз впливу службових сигналів на загальну завадозахищеність ЦСР;
- обґрунтування комплексного підходу до аналізу завадозахищеності ЦСР.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нехай розглядається цифрова система радіозв'язку, яка здійснює прийом сигналів на фоні білого гауссівського шуму. Тривалість біт в ЦСР постійна та узгоджена з постійною смугою пропускання каналу зв'язку. Момент початку, тривалість та інформація повідомлення є випадковими. Як показник ефективності ЦСР, за яким оцінюється її завадозахищеність, використовується ймовірність помилки на біт споживацької інформації.

Виконаємо аналіз інформаційних потоків, що передаються в ЦСР. Їх інтенсивність характеризується технічною та інформаційною швидкостями передачі [7]. Технічна швидкість передачі R дорівнює кількості переданих символів (біт) за секунду, а інформаційна швидкість передачі C дорівнює кількості двійкових одиниць інформації, яка передана за секунду по каналу радіозв'язку. Середня інформаційна

швидкість за тривалість повідомлення – \bar{C} зазвичай менша за технічну швидкість внаслідок наявності службових сигналів та додаткових біт для завадозахищеного кодування, тобто $\bar{C} < R$ [7].

Службові сигнали не переносять споживацьку інформацію, а лише забезпечують узгоджену роботу ЦСР. Але якщо розглядати перенесення інформації як зняття невизначеності [3], то службові сигнали також переносять інформацію про значення певних параметрів в інтервалі їх невизначеності. При цьому інформація, яку переносить службовий сигнал ЦСР, знаходиться не в його амплітуді, а в його часовому положенні. Якщо проаналізувати службовий сигнал часової синхронізації, то він вказує на значення певного синхропараметра (зазвичай, часу) в інтервалі невизначеності ΔT , тому кількість інформації I , яку він переносить, можна оцінити виразом:

$$I = \log_2 \left(\frac{\Delta T}{\sigma_T} \right), \quad (1)$$

де σ_T – середньоквадратична похибка визначення часового положення, с.

При великому часовому інтервалі невизначеності службовий сигнал може переносити об'єм інформації, що є більшим за кількість технічних біт у даному службовому сигналі. Якщо перейти до швидкостей передачі, то, згідно з (1), цілком можлива ситуація, коли $C > R$, що дозволяє зробити висновок про нерівномірність інформаційної швидкості передачі в загальному потоці ЦСР. Крім того, ЦСР передає не тільки споживацьку інформацію, а ще і якусь специфічну інформацію, що передається службовими сигналами та не призначена для споживача. Для виділення специфіки інформації, яка передається за допомогою службових сигналів, введемо визначення системоорганізуючої інформації.

Системоорганізуюча інформація – це інформація, джерелом і споживачем якої є сама цифрова система радіозв'язку і яка призначена для забезпечення взаємоузгодженої роботи елементів цієї системи.

Відповідно загальна інформація, що передається ЦСР, складається з споживацької інформації та системоорганізуючої інформації, яка, в свою чергу, забезпечує правильний прийом споживацької інформації. Носіями системоорганізуючої інформації є службові сигнали ЦСР.

Причому службові сигнали, що передаються перед початком передачі ЦСР, внаслідок широкого інтервалу невизначеності переносять більше системоорганізуючої інформації, ніж ті, що передаються всередині споживацької інформації (сигнали циклової та кадрової синхронізації). Інтервал невизначеності для сигналів циклової та кадрової синхронізації можна розрахувати за виразом [6]:

$$\Delta T = \sigma_T + \Delta t \delta_F + \frac{v \Delta t}{c} = \sigma_T + \Delta t \left(\delta_F + \frac{v}{c} \right), \quad (2)$$

де Δt – часовий інтервал між сигналами циклової (кадрової) синхронізації, с; δ_F – відносна нестабільність частоти опорних генераторів; v – швидкість відносного переміщення передавача і приймача ЦСР, м/с; c – швидкість світла, м/с.

Оцінимо об'єм системоорганізуючої інформації, що передається за допомогою сигналів циклової та кадрової синхронізації – I_K :

$$I_K = \log_2 \left(\frac{\sigma_T + \Delta t \left(\delta_F + \frac{v}{c} \right)}{\sigma_T} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{\Delta t}{\sigma_T} \left(\delta_F + \frac{v}{c} \right) \right). \quad (3)$$

Відповідно до (3), інформаційна швидкість передачі сигналів циклової чи кадрової синхронізації буде також відрізнятися від технічної швидкості передачі ЦСР, тому протягом передачі ЦСР інформаційна швидкість передачі є нерівномірною та має максимум, який відповідає службовим сигналам початку повідомлення.

Оцінимо завадозахищеність ЦСР з урахуванням всього потоку інформації: як споживацької, так і системоорганізуючої, оскільки вони передаються через один і той же радіоканал, піддаються впливу одних і тих же завад і логічно взаємопов'язані відповідно до особливостей побудови ЦСР. Такий аналіз доцільно визначити як **комплексний**, що враховує особливості ЦСР як цілісної системи.

Реалізація цієї можливості потребує врахування такої особливості, як наявність причинно-логічного одностороннього зв'язку правильності прийому споживацької інформації та правильності прийому системоорганізуючої інформації, адже порушення службових сигналів унеможливує подальший правильний прийом споживацької інформації [8]. Причому зворотного зв'язку порушення системоорганізуючої інформації внаслідок порушення споживацької інформації немає, що витікає з особливостей та динаміки функціонування ЦСР [3].

Виконаємо кількісну оцінку впливу помилок прийому службових сигналів на помилки прийому споживацької інформації, для чого врахуємо додаткові помилки від порушення службових сигналів у

ймовірності помилки на біт споживацької інформації. Для початку розглянемо випадок, коли перед інформацією повідомлення передається один службовий сигнал, що є кодовою комбінацією з N -біт, ймовірність помилки прийому якого позначимо як P_C .

Помилки прийому біта споживацької інформації внаслідок дії на нього шумів не виключають помилки його прийому внаслідок порушення службових сигналів, тому вони є сумісними подіями. Максимальне значення ймовірності помилки на біт, в тому числі з урахуванням службових сигналів, повинно дорівнювати 0,5 [3]. Оскільки ймовірність порушення службового сигналу може перевищувати 0,5, необхідно виконати їх взаємне нормування. Для такого випадку комплексна завадозахищеність ЦСР, як ймовірність помилки на біт споживацької інформації з урахуванням помилок прийому службових сигналів, що залежить від відношення сигнал/шум – $P_E'(q)$, – матиме вигляд:

$$P_E'(q) = 0,5 \left[1 - (1 - 2P_E(q))(1 - P_C(q)) \right], \quad (4)$$

де $P_E(q)$ – ймовірність помилки на біт споживацької інформації без врахування помилок прийому службових сигналів; q – відношення сигнал/шум (за амплітудою).

Нехай перед початком передачі споживацької інформації ЦСР передається декілька (M) різних типів службових сигналів (маркер, преамбула, коди адреси та типу повідомлення тощо. [4]), кожен з яких виконує свою функцію у забезпеченні роботи ЦСР та має різну завадозахищеність. В цьому випадку помилка прийому хоча б одного з цих типів службових сигналів призведе до порушення всіх споживацьких біт даної передачі. Крім того, між циклами (кадрами) споживацької інформації передаються сигнали циклової (кадрової) синхронізації, помилки прийому яких призведуть до порушення всіх біт споживацької інформації відповідного кадру (циклу). Тому всі вони мають бути враховані комплексною завадозахищеністю ЦСР для загального випадку, яка дорівнює:

$$P_E'(q) = 0,5 \left[1 - (1 - 2P_E(q))(1 - P_K(q)) \cdot (1 - P_U(q)) \prod_{I=1}^M (1 - P_I(q)) \right], \quad (5)$$

де $P_K(q)$ – ймовірність помилки прийому сигналу кадрової синхронізації; $P_U(q)$ – ймовірність помилки прийому сигналу циклової синхронізації; $P_I(q)$ – ймовірність помилки прийому I -го службового сигналу початку повідомлення.

Аналіз (5) показує, що збільшення типів службових сигналів, що передаються на початку повідомлення (M), призводить до погіршення завадозахищеності ЦСР.

Оцінимо ймовірність помилки прийому службових сигналів початку повідомлення – $P_I(q)$ Як правило, службові сигнали синтезують на основі спеціальних кодових послідовностей (послідовності Баркера, Уїлларда, Спілкера, Ньюмана, Хофмана, Ліндера тощо. [3]). Завадозахищеність таких послідовностей визначається ймовірністю пропуску, яка і є ймовірністю помилки їх прийому – $P_I(q)$:

$$P_I(q) = \sum_{J=K+1}^N C_N^J (P_E(q))^J (1 - P_E(q))^{N-J}, \quad (6)$$

де N – кількість біт (довжина) послідовності; K – порогова кількість біт, яку дозволяється прийняти неправильно.

В свою чергу, параметр K обмежується зверху заданим рівнем імовірності хибної тривоги F узгодженого фільтра послідовності:

$$F = 2^{-N} \sum_{I=0}^K C_N^I. \quad (7)$$

Результати мінімізації суми виразів (6) і (7) показують [9], що відношення K до N або порогова ймовірність помилки на біт, при якій службовий сигнал не виявляється приймачем – β , – становить 0,18–0,21 залежно від N (13–127).

Крім помилок, які є наслідком пропуску службових сигналів (6), необхідно також врахувати вплив похибки вимірювання часу приходу службового сигналу при дії завад – $\sigma_T(q)$, що призводить до збільшення ймовірності помилки на біт споживацької інформації (через часткове руйнування системоорганізуючої інформації). Внаслідок таких похибок (символьної синхронізації [3]) зменшується енергія біта, за якою здійснюється його розрізнення [3], тому дану похибку потрібно врахувати у зменшенні відношення сигнал/шум або у збільшенні ймовірності помилки на біт споживацької

інформації – $P_E(q, \sigma_T(q))$. Таким чином, вираз (5) потребує уточнення щодо $P_E(q)$ з урахуванням похибок символної синхронізації шляхом заміни на $P_E(q, \sigma_T(q))$, тоді:

$$P_E'(q) = 0,5 \left[1 - (1 - 2P_E(q, \sigma_T(q))) (1 - P_K(q)) \cdot (1 - P_U(q)) \prod_{I=1}^M (1 - P_I(q)) \right] \quad (8)$$

Відповідно до вищезазначеного, комплексну оцінку заводозахищеності ЦСР доцільно проводити таким чином:

1. Оцінка заводозахищеності всіх M складових елементів початку передачі повідомлення (коду розпізнавання, маркера, преамбули, ключа шифру, коду адреси та типу повідомлення тощо) як функції ймовірності пропуску від відношення сигнал/шум – $P_I(q)$, $I = 1 \dots M$.

2. Оцінка заводозахищеності службових сигналів, що передаються всередині повідомлення (сигналів циклової – $P_U(q)$ – та кадрової – $P_K(q)$ – синхронізації) як функції ймовірності пропуску від відношення сигнал/шум.

3. Оцінка ймовірності помилки на біт споживацької інформації з урахуванням похибок символної синхронізації – $P_E(q, \sigma_T)$.

4. Оцінка залежності похибок символної синхронізації від відношення сигнал/шум з урахуванням типу та параметрів маніпуляції сигналу і підсистеми символної синхронізації ЦСР – $\sigma_T(q)$.

5. Оцінка ймовірності помилки на біт споживацької інформації з урахуванням похибок символної синхронізації – $P_E(q, \sigma_T(q))$.

6. Визначення комплексної заводозахищеності ЦСР за виразом (8).

Крім того, збільшення ймовірності помилки на біт $P_E'(q)$ (8) відносно $P_E(q)$ еквівалентно зменшенню відношення сигнал/шум або збільшенню потужності внутрішніх шумів приймача ЦСР. Тому у розрахунках доцільно використовувати еквівалентне відношення сигнал/шум – q' , яке враховує заводозахищеність системоорганізуючої інформації. Тоді комплексну заводозахищеність ЦСР можна оцінити за виразом:

$$P_E'(q) = P_E(q') = P_E(q - \Delta q) \quad (9)$$

Зменшення відношення сигнал/шум – Δq – розраховується як корінь рівняння:

$$P_E(q - \Delta q) = P_E'(q) \quad (10)$$

Відповідно до розробленої методики, виконаємо комплексний аналіз заводозахищеності ЦСР з двійковою частотною маніпуляцією (2ЧМн) та одним службовим сигналом у вигляді послідовності Хофмана з $N = 63$ та $K = 14$ [9], який передається на початку повідомлення для часової прив'язки демодулятора. Ймовірність помилки на біт споживацької інформації при прийомі сигналів з 2ЧМн без урахування службових сигналів визначається таким виразом [2]:

$$P_E(q) = 0,5 \exp \left\{ -\frac{q^2}{4} \right\} = 0,5 \exp \left\{ -\frac{\mathcal{E}}{2N_o} \right\}, \quad (11)$$

де \mathcal{E} – енергія біта, Дж; N_o – спектральна густина потужності шумів, Вт/Гц.

Для сигналів з 2ЧМн вплив похибок символної синхронізації на енергію біта визначається так [3]:

$$\mathcal{E}(\sigma_T) = \mathcal{E} \left[4 \left(\frac{\tau - \sigma_T}{2\tau} \right)^2 + 4 \left((2\pi f\tau)^{-1} \sin \left(\frac{2\pi f\sigma_T}{2} \right) \right)^2 \right], \quad (12)$$

де τ – тривалість біта, с; f – різниця частот нуля та одиниці, Гц.

Похибку символної синхронізації доцільно оцінити як середньоквадратичну похибку визначення часового положення службового сигналу, яка визначається тривалістю біта та становить [4]

$$\sigma_T = \frac{\tau}{q\sqrt{\pi}} = \frac{\tau\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi\mathcal{E}}} \quad (13)$$

З урахуванням помилки символної синхронізації, але без урахування ймовірності пропуску службового сигналу, ймовірність помилки на біт споживацької інформації визначається таким чином:

$$P_E(q, \sigma_T(q)) = 0,5 \cdot \exp \left\{ -q^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2q\sqrt{\pi}} \right)^2 + \left(\pi \sin \left(\frac{2\pi f \tau}{2q\sqrt{\pi}} \right) \right)^2 \right] \right\}. \quad (14)$$

Відповідно до (6), (8), (11), (14) графік комплексної завадозахищеності такої ЦСР як функції ймовірності помилки на біт споживацької інформації від відношення сигнал/шум – $P_E'(q)$ – має вигляд, що наведений на рис. 1.

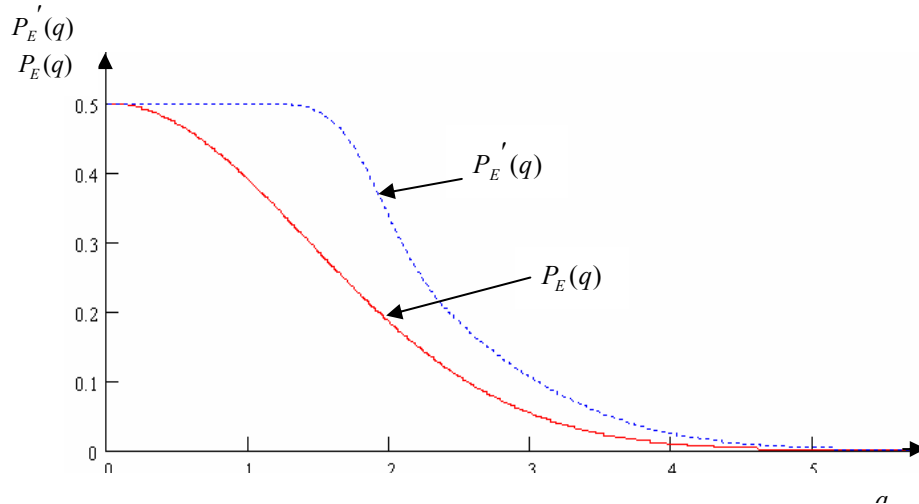


Рис. 1. Комплексна завадозахищеність ЦСР

Аналіз розрахунків (рис. 1) показує, що в області значень $q > 6$ результати комплексного підходу ($P_E'(q)$) практично збігаються з результатами існуючого аналізу завадозахищеності ЦСР ($P_E(q)$). Але в умовах складної радіоелектронної обстановки ($q < 6$) комплексна завадозахищеність ЦСР є набагато гіршою, ніж завадозахищеність споживацької інформації. Дане погіршення виникає внаслідок руйнування системоорганізуючої інформації та порушення взаємодії елементів ЦСР. Крім того, при $q < 1,4$ ЦСР буде абсолютно нездатна функціонувати ($P_E' = 0,5$), незважаючи на те, що $P_E = 0,24$, тобто виникає певний пороговий ефект (рис. 1), який раніше не враховувався при аналізі завадозахищеності ЦСР. В області значень q від 1 до 5 різниця між $P_E'(q)$ та $P_E(q)$ становить близько 40 %, що і є кількісною оцінкою підвищення точності аналізу завадозахищеності ЦСР при використанні розробленого комплексного підходу.

Висновки з дослідження. Таким чином, в результаті проведених досліджень показано доцільність комплексного аналізу завадозахищеності ЦСР з урахуванням формування, передачі та обробки системоорганізуючої інформації. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність оцінки завадозахищеності ЦСР до 40 %.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Перспективи подальших розвідок у даному напрямку полягають в конкретизації отриманих загальних результатів дослідження відносно існуючих типів ЦСР при розробці методів їх синтезу та підвищення завадозахищеності, а також в інтересах радіозаглушення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Torrieri D. J. Principles of Military Communication Systems. – Dedham, MA: Artech House Inc., 1981. – 441 p.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
4. Радиосистемы передачи информации / И.М. Тепляков, Б.В. Рошин, А.И. Фомин, В.А. Вейцель / Под ред. И.М. Теплякова. – М.: Радио и связь, 1982. – 264 с.

5. Міщенко В.Г., Єрохін В.Ф. Методика оцінки завадозахищеності алгоритмів входження в синхронізм радіолінії з псевдовипадковим перелаштуванням радіочастоти // Захист інформації. – К.: НАУ, 2001. – № 2. – С. 39–52.
6. Горячев А.А. Каналы радиосвязи АСУ ТП. – М.: Связь, 1980. – 216 с.
7. Информационные технологии в радиотехнических системах / В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др. / Под ред. И.Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 768 с.
8. Курьянов А.И., Сахаров А.В. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. – М.: Вузовская книга, 2003. – 412 с.
9. Міщенко В.Г., Єрохін В.Ф., Романов О.І. Ймовірність входження в синхронізм радіолінії з повільним псевдовипадковим перелаштуванням радіочастоти // Збірник наукових праць КВІУЗ. – К.: КВІУЗ, 2001. – № 3. – С. 81–86.

ПАНОВ Альберт Федорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– криптозахист інформації.

ЦИПОРЕНКО Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент, заступник декана радіотехнічного факультету Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– радіоелектроніка з використанням цифрової обробки сигналів.

ЖУРАВСЬКИЙ Юрій Володимирович – ад'юнкт кафедри радіоелектронної боротьби Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– завадозахищеність складних радіотехнічних систем.

Подано 07.06.2006