

УДК 621.391.827

Серих С. О. (Державний університет телекомунікацій. +380 (44) 249 25 64. +380 (50) 381 84 93)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕМІВ КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ

Серих С. О. Методика визначення показників ефективності модемів каналів керування телекомунікаційних засобів зв'язку. В статті наведена методика визначення показників ефективності модемів каналів керування (КК) телекомунікаційних засобів зв'язку, що дозволяє надійно і всебічно оцінити модеми складних сигналів КК за багатьма показниками. Така оцінка є необхідною та достатньою і забезпечує вибір оптимальних параметрів складних сигналів модемів КК та раціональний розподіл енергетичних та частотних ресурсів сумісно діючих потоків повідомлень. Методика визначення показників ефективності модемів КК є узагальненою. Вона може бути адаптована при зміні пріоритетів в оцінці за умови зміни вимог до модемів КК або режимів їх роботи.

Ключові слова: телекомунікації, модем, канал керування, засоби зв'язку, показники ефективності, енергетичний і частотний ресурс, складний сигнал

Серых С. А. Методика определения показателей эффективности модемов каналов управления телекоммуникационных средств связи. В статье приведена методика определения показателей эффективности модемов каналов управления (КУ) телекоммуникационных средств связи, что позволяет надежно и всесторонне оценить модемы сложных сигналов КУ по многим показателям. Такая оценка является необходимой и достаточной и обеспечивает выбор оптимальных параметров сложных сигналов модемов КУ и рациональное распределение энергетических и частотных ресурсов совместно действующих потоков сообщений. Методика определения показателей эффективности модемов КУ является обобщенной. Она может быть адаптирована при изменении приоритетов в оценке при условии изменения требований к модемам КУ или режимов их работы.

Ключевые слова: телекоммуникации, модем, канал управления, средства связи, показатели эффективности, энергетический и частотный ресурс, сложный сигнал

Syerykh S. O. Method for determination of efficiency of the control channel modems of the telecommunication equipment. In the article it is described the technique of definition of performance indicators of the control channel (CC) modems of the telecommunication equipment that allows to evaluate reliably and comprehensively the CC modems complex signals in many respects. Such an assessment is essential and sufficient, it provides the optimum parameters selection of the CC modems complex signals and rational distribution of energy and frequency resources within the message streams. Method for determination of efficiency of control channel modems is generalized. It can be adapted with the change of priorities in the evaluation subject to modification of requirements for the CC modems or their operation mode.

Keywords: telecommunications, modem, control channel, telecommunication equipment, performance indicators, energy and frequency resource, complex signal

Вступ. Постановка задачі. Постійне зростання технічних можливостей спеціалізованих засобів постановки завдань та об'єднання їх в комплекси радіо електронної боротьби (РЕБ) потребує дослідження та оцінки ефективності функціонування телекомунікаційних засобів зв'язку (ТЗЗ), як імовірного об'єкту пригнічення. Дієвість впливу комплексів РЕБ на ТЗЗ підвищується за умови порушення керування самим засобом, системою або мережею зв'язку. Тому оцінка ефективності роботи каналів керування в умовах дії завдань є визначною і потребує обґрунтованого вибору показників, що дозволяють проводити таку оцінку.

Складність полягає в тому, що обмін командною інформацією в більшості зразків ТЗЗ здійснюється сумісно з інформаційним повідомленням при визначеному розподілі енергетичного, частотного, часового та інших ресурсів засобу зв'язку. Крім того швидкість передачі інформації, структура сигналів, принципи їх формування і мультиплексування сигналів каналів керування (КК) і групового інформаційного сигналу (ГІС) може суттєво відрізнятися. Для систем передачі інформації (СПІ) без спеціального кодування для захисту мультиплексованих потоків інформації в формуванні і обробці сигналів основна роль відводиться модемам КК та ГІС. При цьому достатньо детально розроблені методики

визначення ефективності СПІ на основі технічних критеріїв [1-4], що оцінюють відповідність критеріям аналізу каналів різноманітного призначення за одним показником, що визначає їх функціональність або використання як самостійного компонента без урахування взаємозалежності, взаємовпливу сигналів різних каналів.

Постановка завдання. Для високошвидкісних модемів СПІ показниками якості є максимально можлива швидкість передачі інформації R_i , за умови, що забезпечується задана імовірність помилки $Q_{пз}$ біта інформації. В даному випадку використовують методику спрощену. Проте вона потребує для аналізу приведення зовнішніх умов і вимог до одного значення. В системах високої достовірності таких як, КК, де головним показником якості являється імовірність помилки $Q_{п кк}$, що залежить від співвідношення сигнал/шум, а швидкість передачі обмежена та фіксована. При цьому оцінка може здійснюватись за показником використання пропускнуої спроможності каналу [5], а в умовах завад за показником, що визначає рівень пригнічення КК пов'язаним з потужністю завади $P_з$, сигналу $P_с$, або їх співвідношення – коефіцієнта пригнічення $\eta=P_з/P_с$. Показниками якості інших систем може бути енергетична і частотна ефективність модемів, але в якості узагальненого показника частіше використовують η [1, 2, 6, 7].

Для модемів КК визначними є вимоги завадостійкості, бо КК повинні забезпечити обмін командами в будь-яких умовах, в тому числі при потужних навмисних завадах, що енергетично пригнічують ГІС станції зв'язку. У цьому випадку використання коефіцієнта пригнічення η для оцінки модемів КК являється виправданим, але не достатнім. *По-перше*, крім завади на вхід демодулятора потрапляє взаємна завада від ГІС і η повинен це оцінювати. *По-друге*, КК може функціонувати в самостійному режимі, коли передача інформаційного повідомлення відсутня. Тоді потрібен показник, що забезпечить оцінку модему КК в умовах шуму. *По-третє*, при відсутності навмисних завад, але обміну сигналами КК та ГІС в ТЗЗ використання η недоцільне, бо потрібна оцінка не пригнічення КК а рівня впливу на нього з метою подальшого визначення таких методів мультиплексування потоків, що забезпечать найменший взаємний вплив при раціональному розподілу ресурсів ТЗЗ.

В роботі вирішується наукове завдання розробки методики вибору показників ефективності модемів КК.

Показники ефективності модемів каналів керування. Одним з дієвих способів боротьби з потужними навмисними завадами є використання складних сигналів, які за рахунок виду їх спектру ще називають шумоподібними або сигналами з розширеним спектром [3, 4, 7]. Тоді до складу модемів КК додаються пристрої формування та обробки складних сигналів. Основний ефект в боротьбі з завадами досягається в пристрої згортки складного сигналу, в якості якого застосовують корелятори або узгоджені фільтри. Рівень завадозахисту таких модемів пропорційний значенню бази складного сигналу $B_с$, яка значно більше одиниці. Підвищення ефективності обробки складних сигналів на основі застосування методів спектрального аналізу [8] суттєво впливає на вибір сигналів і їх завадостійкість. Тому для визначення ефективності протидії модемів КК навмисним завадам доцільно використовувати коефіцієнт пригнічення $\eta=P_з/P_с$, за умови дії комплексної завади, що складаються з навмисних завад комплексів РЕБ та взаємного ГІС з потужністю $P_{з\sum}=P_з+P_{ГІС}$. Для оцінки ефективності модемів низькошвидкісних завадозахищених КК використовують коефіцієнт пригнічення $\eta_{кк}$ каналу керування за умови:

$$\eta_{кк} = \frac{P_{з\sum}}{P_{кк}} \mid Q_{п} = Q_{пз}, \quad (1)$$

що дорівнює добутку потужностей комплексної завади та сигналу КК на вході приймача командної інформації, при перевищенні якого достовірність передачі команд стає гірше заданої. Цей показник характеризує здатність КК протистояти впливу навмисних завад і дозволяє оцінити ефективність модему КК для двох варіантів передачі команд сумісно з передачею інформаційних повідомлень і окремо.

При застосуванні методу підвищення завадостійкості КК і використання складних сигналів пропорційно B_c поширюється і смуга частоти ΔF_c складного сигналу КК, що робить застосування частотного та часового методу мультиплексування потоків недоцільним. Для кодового мультиплексування виявляються недоліки, що пов'язані з обмеженням параметрів сигналу КК і відсутністю незалежності потоків. Найбільш доцільним способом об'єднання складного сигналу КК з ГІС є передача команд під інформаційним повідомленням.

Використання тільки η_{kk} для оцінки ефективності модемів складних сигналів є недостатнім, бо імовірна ситуація однаковості значення показника декількох модемів КК, але неможливості для одних реалізації вимоги по незалежності КК від ГІС, а для інших використання ефективного їх об'єднання. Крім того при передачі команд під ГІС в визначені η_{kk} виникають суттєві складності, що полягають в наступному.

Завадостійкість лінії зв'язку залежить від $h^2 = E_c/N_3$, що представляє собою відношення енергії сигналу до спектральної щільності завади. Для приймача командного сигналу $E_c = E_{kk}$, де E_{kk} – енергія складного сигналу КК, а завадою є адитивна суміш флуктуаційного шуму, навмисної завади і взаємної завади від ГІС, діюча в смузі ΔF_c з потужностями $P_{ш}$, P_3 , $P_{гіс}$ – відповідно. Так як модель приймача командного сигналу [6] складається з приладу згортки складного сигналу та демодулятора команд, то на виході приладу відношення E_{kk} до N_3 можна записати наступним чином:

$$h^2 = \frac{P_{kk}}{P_{ш} / B_c + P_3 / \beta + P_{гіс} / K}, \quad (2)$$

де β і K – коефіцієнти пригнічення навмисної завади і ГІС сигналу пристроєм згортки модему КК відповідно.

Із (2) з урахуванням (1)

$$\eta_{kk} = \beta \left(\frac{1}{h_n^2} - \frac{1}{Ch_n^2} - \frac{P_{ш}}{KP_{kk}} \right), \quad (3)$$

де: $C = \frac{P_{kk}}{P_{ш}} \times \frac{B_c}{h_n^2} = \frac{h_{ш}^2}{h_n^2}$ – необхідний енергетичний запас на шум ТЗЗ; $h_{ш}^2$ – відношення E_{kk}

до спектральної щільності потужності шуму N_0 ; h_n^2 – необхідне для забезпечення $Q_{пз}$ відношення сигнал/шум, відповідного типу демодулятора командного сигналу.

Аналіз виразу (3) показує, що η_{kk} прямо пропорційно β , що лінійно залежить від B_c . Отже вираш від використання складних сигналів β [6] при взаємодії потужних навмисних завад і визначає значення η_{kk} . Оцінку ефективності модемів КК за показником (3) необхідно проводити при незмінних типах і параметрах сигналів, таких як B_c , швидкості передачі потоків їх потужності. Крім того h_n^2 для модемів може відрізнятися також. Тому при $P_{kk} = const$ може виявитись, що для деяких h_n^2 значення C буде настільки маленьке ($C \rightarrow 1$), що вираш від використання складного сигналу β практично не буде впливати на значення η_{kk} . Але при незначному збільшенні C ситуація може суттєво змінитися, так як залежність $\eta_{kk} = f(C)$ найбільш різко проявляється при малих значеннях C . Аналогічна ситуація може виникнути при зміні потужності $P_{гіс}$ та P_{kk} та фіксованому C . Тому тільки при порівнянні η_{kk} оцінка ефективності модемів буде помилковою.

Виходячи з цього, при фіксованих C та добутку $P_{ГІС}/P_{КК}$ для модемів, що порівнюються, потрібно ввести додаткові показники ефективності які дозволяють оцінити інші властивості модемів або ефективність їх функціонування в інших режимах роботи КК. Це можуть бути:

1) ξ – показник, який характеризує додаткові затрати потужності складного сигналу КК на недосконалість розробленого модему, тобто енергетичні втрати модемів при їх роботі тільки в умовах флуктуаційного шуму:

$$\xi = h_m^2 / h_k^2, \quad (4)$$

де h_m^2, h_k^2 – потрібні значення відношення сигнал/шум для модему КК та оптимального когерентного приймача протилежних сигналів, відповідно.

2) Ψ – показник, який дозволяє оцінити ефективність модему КК при способі мультиплексування потоків, що оцінюють в лініях сумісної передачі команд та інформаційних повідомлень:

$$\Psi = (P_{КК} + P_{ГІС}) / (P_{КК} + P_{ГІС})_i = P_{ГІС} / P_{ГІС}_i, \quad (5)$$

де $(P_{КК} + P_{ГІС}), (P_{КК} + P_{ГІС})_i$ – сумарна потужність сигналу КК та ГІС, тобто групового сигналу (ГС) з потужністю $P_{ГІС}$ при оцінюваному способі та ідеальному способі об'єднання КК та КК потужності $P_{ГІС}_i$. Під ідеальним слід розуміти такий недосяжний спосіб об'єднання, при якому будь який взаємний вплив сигналів виключається.

Даний показник розраховується при постійних $P_{ГІС}, P_{КК}$ модемів заводозахищених КК, фіксованих значеннях швидкості передачі команд і інформаційних повідомлень та імовірності помилки, що потребується для обох типів сигналів.

Для подальшого дослідження можна ввести додаткові другорядні показники ефективності модемів КК, що оцінюють їх інші властивості. Але, по-перше вони не є визначальними, а по-друге їх значна кількість суттєво ускладнить багатокритеріальну оцінку і зробить складно-оглядовими результати порівняння модемів КК. При використанні багатьох показників потрібно встановити їх пріоритетність в оціні ефективності модемів КК та можливі залежності. Якщо при оцінці ефективності модемів КК за всіма показниками отримані однакові результати, то кращим слід вважати той, що має простішу реалізацію.

Таким чином, ефективність модемів КК доцільно оцінювати трьома показниками, серед яких $\eta_{КК}$ є головним, а ξ і Ψ – додатковими. Це потребує уточнення методики їх застосування.

Показник $\eta_{КК}$ (3), що оцінює заводостійкість модемів КК, виражений через відношення потужності завади и сигналу на вході приймача команд при якому $Q_{П} \leq Q_{Пд}$, де $Q_{Пд}$ – це максимально допустиме значення потрібне для надійного керування засобами зв'язку.

Методика визначення показників ефективності модемів КК. Враховуючи [9] – ймовірність помилкового прийому команд слід визначити як $Q_{Пд} = 10^{-5}$. Тоді методика знаходження $\eta_{КК}$ зводиться до визначення заводостійкості модему КК, тобто визначення залежності $Q_{П} = f(P_{З\Sigma} / P_{КК})$, в умовах дії імовірної найбільш небезпечної завади при $P_{КК} = \text{const}$. Але так як функціонал залежить не тільки від $P_{З\Sigma}$, але й від типу і виду завади, її розповсюдження в частотно-часовій площині та кореляції з сигналом, то доцільно першочергово визначити множину імовірних завод, а для конкретного типу складного сигналу вибирати найгіршу. Будемо рахувати, що вид сигналу, параметри, структура модему відомі. Тоді застосування найгіршої завади приводить до мінімального значення $\eta_{КК}$ модему КК. Більш ефективним слід рахувати той із модемів КК, який забезпечує найбільший із мінімальних $\eta_{КК}$ тобто визначається функціонал $\max \min(\eta_{КК})$. При визначенні $\eta_{КК}$ визначними є вимоги до $Q_{ПЗ}$, що залежать від варіанту функціонування модему КК. Якщо складний сигнал КК передається разом з ГІС, то заводою сигналу КК є суміш шуму,

найбільш вірогідної завади та ГІС, якщо окремо, то діє тільки шум та потужна завада. Разом з тим загальне відношення для визначення $\eta_{\text{КК}}$ має вид

$$\eta_{\text{КК}} = \frac{1}{h_n^2} + \frac{1}{h_3^2} + \frac{1}{h_{\text{зіс}}^2}. \quad (6)$$

А для оцінки $\eta_{\text{КК}}$ при другому варіанті останній доданок виключається. Це *перший етап* методики визначення показників ефективності модемів КК.

Якщо модеми які порівнюються однаково ефективні в умовах завад то доцільно віддати перевагу більш завадостійкому в шумах. Для цього і введено – ξ , визначення якого, зводиться до визначення завадостійкості модему КК по відношенню до ідеального приймача протилежних сигналів – оптимальному [2, 3, 5] в флуктуаційних шумах – це *другий етап*.

Простота в зміні режимів завадо захисту КК досягається завдяки незалежності сигналу КК та ГІС, що є визначною вимогою до модемів КК.

Аналіз способів об'єднання потоків [9, 10] показує, що одні неефективні для завадостійких модемів КК, при інших неминуче проявляються взаємні впливи, що збільшують Q_p , як інформаційних повідомлень так і командної інформації.

Оскільки взаємні впливи для різних способів об'єднання нерівнозначні, то для *третього етапу* застосовується ψ . Порядок його визначення полягає в наступному. Припустимо, що існує ідеальний спосіб об'єднання ГІС та КК, при якому взаємні впливи відсутні, а потужність $P_{\text{ГІС}}$ розподілена між $P_{\text{КК}}$ та $P_{\text{ГІС}}$ пропорційно швидкості передачі оперативної та командної інформації – $R_{\text{ГІС}}$ та $R_{\text{КК}}$ відповідно.

Тоді вихідну потужність ТЗЗ без урахування окремих витрат можна записати:

$$P_{\text{ГІС}} = P_{\text{ГІС}} \cdot (1 + P_{\text{КК}} / P_{\text{ГІС}}). \quad (7)$$

Відношення енергії ГІС до спектральної щільності шуму – $h_{\text{ГІСзіс}}^2$, для ідеального способу і забезпечення заданої достовірності:

$$h_{\text{ГІСзіс}}^2 = \frac{E_{\text{ГІС}}}{N_0} = \frac{P_{\text{ГІС}} T_{\text{ГІС}}}{P_{\text{ш}} / \Delta F_{\text{ГІС}}}, \quad (8)$$

де $T_{\text{ГІС}}$, $\Delta F_{\text{ГІС}}$ – тривалість та смуга частот інформаційного сигналу.

Для реальних способів поєднання сигналів потужність ГІС також складається з потужності ГІС та сигналу КК, але суттєво проявляється взаємний вплив, що призводить до погіршення завадостійкості обох сигналів та потребує додаткового збільшення енергії ГІС для забезпечення $h_{\text{ГІСзіс}}^2$:

$$h_{\text{ГІСзіс}}^2 = \frac{E_{\text{ГІС}}}{N_0 + N_{\text{КК}}} = \frac{P_{\text{ГІС}} T_{\text{ГІС}} \Delta F_{\text{зіс}}}{P_{\text{ш}} + \gamma(f) P_{\text{КК}}}, \quad (9)$$

де: $N_{\text{КК}}$ – спектральна щільність потужності сигналу КК в смузі ГІС; $\gamma(f)$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу $P_{\text{КК}}$ в смузі частот командного сигналу.

Прагнення до ідеальності дозволяє порівняти ліві і відповідно праві частини в (8) та (9). Тоді сумарна доля ГІС в ГІС:

$$P_{\text{ГІС}} = [1 + \gamma(f) P_{\text{КК}} / P_{\text{ш}}]. \quad (10)$$

По аналогії для модему КК сумарна доля :

$$P_{\text{КК}\Sigma} = [1 + \alpha(f) \cdot P_{\text{ГІС}} / P_{\text{ш}}], \quad (11)$$

де $\alpha(f)$ коефіцієнт, враховуючий вплив ГІС при нерівномірності його розподілу в смузі складного сигналу КК.

Отримані (10) та (11) дозволяють визначити $P_{\text{ГІС}}$ та розрахувати ψ підставивши їх до виразу (5) для способів об'єднання сигналів, що розглядаються. Знаходження ψ зводиться до визначення взаємних впливів ГІС та команд, тобто знаходженню $\gamma(f)$ та $\alpha(f)$. Оптимальним

за ψ слід рахувати той модем, який дозволяє реалізувати найбільш близький до ідеального спосіб поєднання сигналів.

Висновок. Таким чином наведена методика визначення показників ефективності модемів КК дозволяє надійно і всебічно оцінити модеми КК за багатьма показниками. Така оцінка є не тільки достатньою а і необхідною, тому що забезпечує вибір оптимальних параметрів складних сигналів модемів КК, раціональне використання енергетичних та частотних ресурсів сумісно діючих сигналів КК і ГІС. Застосування наведеної методики має перевагу. Вона полягає в тому, що є узагальненою і може бути адаптована при зміні пріоритетів в оцінці за умови зміни вимог до модемів КК або режимів їх роботи.

Якщо боротьба з завадою не є пріоритетом то головним стає ξ , а $\eta_{\text{КК}}$ і Ψ додатковими показниками оцінки ефективності.

Коли першочерговим завданням є вибір виду мультиплексування потоків, що реалізують їх відносну незалежність та мінімізацію взаємного впливу, то головним стає Ψ , а інші додатковими.

Література

1. Стеклов В. К. Теорія електричного зв'язку / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – К.: «Техніка», 2006. – 552 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. – [2-е изд.]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003, –1104 С.
3. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Viterbi A. J. Spread spectrum communications: myths and realities // IEEE Communicatons Magazine, may 2002, pp. 34-41
5. Харкевич А. А. Борьба с помехами / А. А. Харкевич. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 280 с.
6. Барлабанов В. В. Эффективность применения сложных сигналов в условиях помех / В. В. Барлабанов, С. А. Серых, А. И. Звягин // Радиоэлектроника, Изв. вузов МВ и ССО СССР. – 1989. – Т.34, №4. – С. 82-84.
7. Серых С. А. Методика выбора составных широкополосных сигналов для мобильных систем CDMA/ С. А. Серых, В. Р. Соловьев, О. В. Кокотов // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2009. –Т.7, №2. – С. 112-117.
8. Вишнівський В. В. Підвищення ефективності обробки складних і нестационарних сигналів на основі застосування альтернативного методу спектрального аналізу / В. В. Вишнівський // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2012. – № 3 (23). – С. 61-65.
9. Серых С. А. Исследование возможности помехозащищенной передачи служебной информации в радиосистемах с частотным разделением каналов и частотной модуляцией / С. А. Серых, В. П. Вахрушев, В. В. Анохин // – 1984. – КВВИУС НТЗ №1. – С. 88-91.
10. Коржик В. И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений. Справочник / В. И. Коржик, Л. М. Финк, К. Н. Щелкунов. – М.: Радио и связь, 1981. – 231 с.