

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МАСКУВАННЯ СИГНАЛІВ В КАНАЛАХ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Розглянуто методику оцінки якості маскування сигналів у каналах радіозв'язку, в якій використано інформаційно-ентропійний критерій якості приймання радіосигналів. Основною відмінністю нового критерію від традиційного критерію відношення правдоподібності є заміна енергетичної процедури оптимального приймання на більш загальну інформаційно-енергетичну процедуру. Застосування ентропії як характеристики якості маскувальних завадових сигналів дозволяє оцінювати потенційні можливості завад незалежно від способів їх обробки в каналах зв'язку.

Ключові слова: канали радіозв'язку, скритність, маскування радіосигналів, маскувальна завада, коефіцієнт якості маскування, ентропія, оцінка ефективності.

Вступ

В даний час відбувається інтенсивний розвиток інформаційних систем різного призначення, що використовують радіоканал для передачі даних. При цьому застосовують комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на підвищення скритності корисного сигналу в радіоканалі. Поняття *скритність* засобів радіозв'язку характеризує здатність протистояти діям радіотехнічної розвідки, спрямованим на виявлення факту функціонування засобів радіозв'язку і визначення необхідних для радіопротидії параметрів сигналу. Завдання забезпечення енергетичної та просторової скритності засобів радіозв'язку є надзвичайно актуальним. І якщо приховати факт передачі практично неможливо, то ускладнити аналіз і зробити практично неможливим виявлення місця розташування передавача на сьогоднішній день цілком здійсненне завдання.

Скритність ведення радіозв'язку може бути в принципі забезпечена чотирма способами або поєднанням кількох прийомів: скороченням тривалості сеансу зв'язку до такої величини, при якій технічно неможливе не тільки перехоплення, але і виявлення самого факту передачі; забезпеченням вузької діаграми спрямованості передавача (коли здійснення радіоперехоплення можливо лише в разі розташування розвідувального приймача строго на осі каналу зв'язку між функціональними передавачем і приймачем; маскуванням корисних сигналів передавача на тлі радіошумів (інформаційні сигнали мають рівень на один-два порядки нижче рівня "шуму"); "хопінгом", тобто зміною частоти несучого сигналу передавача зі швидкістю понад 1000 разів в секунду за законом, відомим тільки функціональному приймачу.

У зв'язку з ускладненням структури сигналів в каналах радіозв'язку та елементної бази приймально-передавальної апаратури, методи формування маскувальних сигналів і прихованої передачі інформації постійно удосконалюються. Останнім часом для радіомаскування ліній зв'язку широко застосовують вузькосмугові штучні шумові завади з кутовою модуляцією, що мають хороші маскувальні властивості. Принципова можливість створення енергетично вигідних упереджувальних прицільних за частотою завад з'явилась після впровадження в системи радіоелектронної боротьби цифрових пристроїв запам'ятовування частоти перехоплених сигналів на тривалий час [1].

При розробці та експлуатації засобів радіозв'язку першочергове значення має вибір критеріїв їх ефективності. Практикою встановлено [2], що в якості критерія ефективності засобів радіозв'язку повинен бути обраний такий показник, який вдовольняє наступним основним вимогам: показник повинен відповідати меті досліджень і відображати основне призначення засобів радіозв'язку; показник повинен бути зв'язаний з характеристиками (параметрами) засобу радіозв'язку і чутливий до змін цих характеристик; показник повинен бути максимально простим.

Метою публікації є обґрунтування ентропійно-інформаційного критерію та методики оцінки якості маскування сигналів у каналах радіозв'язку.

Інформаційно-ентропійний критерій якості маскувальної завади

Сучасна теорія оптимального приймання радіосигналів базується на апараті теорії імовірностей і математичної статистики [3]. До основних обмежень цього математичного апарату відносяться припущення про необмеженість часу оцінювання статистичного параметра, сталість закону його розподілу або про те, що вимірюваний в процесі досліджень параметр не змінює свого значення.

Ускладнення радіотехнічних засобів формування та обробки сигналів на тлі маскувальних завад призводить до ситуації, коли практичні завдання оцінки якості приймання радіосигналів не можуть бути коректно вирішені методами математичної статистики і теорії імовірностей. Подолати обмеженість традиційної статистичної моделі приймання сигналів дозволяє перехід до інформаційних уявлень про кількість і якість інформації, яку містить сигнал.

Якщо розглядати поняття ентропії в якості міри невизначеності про що-небудь, то повідомлення, передане по каналу зв'язку, зменшує апріорну ентропію, а шум (завада) в каналі збільшує ентропію повідомлення.

Аналіз дезінформаційної дії випадкових завад з різними законами розподілу імовірностей привів К. Шеннона до висновку, що дезінформація визначається не лише потужністю завади а й залежить від виду закону розподілу завади. Найбільший дезінформаційний вплив вносить завада з гауссовим законом розподілу.

Якщо завада в імовірнісному сенсі не залежить від сигналу, незалежно від закону розподілу і потужності сигналу дезінформаційна дія завади визначається її ентропією

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \ln p(x) dx, \quad (1)$$

де $p(x)$ – одномірна густина розподілу імовірностей (ГРІ) оцінюваного інформативного параметра x , безрозмірна величина.

Важливою особливістю ентропії (1) є те, що її загальне поняття як міри невизначеності процесу зводиться до числового значення ГРІ і нею можна оперувати як фізичною величиною.

Ентропія нормального закону розподілу при рівних енергіях випадкових процесів максимальна і характеризується повною відсутністю кореляційних зв'язків між формуючими процес випадковими флуктуаціями сигналу або складовими його процесами. Завада з таким законом розподілу є математичною ідеалізацією завади з найкращою дезінформаційною дією (білий шум).

Ентропія ГРІ досить просто обчислюється і вимірюється через ГРІ оцінюваної випадкової величини. Найбільш простим є метод вимірювання ГРІ за допомогою оцінювання відносного часу перебування випадкової величини в заданому інтервалі значень [3].

В [5] показано, що при однакових значеннях відносної похибки час вимірювання ентропії суттєво менший за час вимірювання одномірної ГРІ, що важливо при вимірюваннях короточасних і швидкоплинних випадкових процесів. Якщо вимірюваний випадковий процес суттєво нестационарний, то оцінки ГРІ є випадковим процесом зі своїм законом розподілу. В цьому випадку необхідно оцінювати закон розподілу, що в ряді випадків дозволяє отримувати надійну інформацію і з істотно нестационарних процесів.

У фундаментальній роботі, що має важливе практичне значення [3] показана принципова можливість вимірювання ентропії ГРІ через вимір кореляційної функції. Ця можливість обумовлена математично встановленим взаємозв'язком між кореляційною функцією, законом розподілу, моментними характеристиками і ентропією ГРІ випадкового процесу. Остання обставина спрощує вимір ентропії за допомогою мікропроцесорної техніки. В якості основних моделей ГРІ використовують розподіл Релея і узагальнений розподіл Релея (розподіл Райса).

Похідною від ентропії ГРІ характеристикою є коефіцієнт якості шуму, який визначається через ентропію ГРІ наступним чином [3]:

$$\eta = \frac{1}{2\pi e} \exp[2H(x)] \quad (2)$$

Коефіцієнт якості шуму має ту ж розмірність, що і ентропія, але більш широко застосовується в радіотехніці для оцінки якості радіозавад.

Кількість інформації I визначається як різниця ентропій [4]:

$$I = H(x) - H(x/x_n) \quad (3)$$

де $H(x)$ – ентропія оцінюваної величини до вимірювання;

$H(x/x_n)$ – умовна ентропія дійсного значення X вимірюваної величини після вимірювання.

Фізично (3) трактується як кількісна міра зменшення невизначеності при оцінюванні невідомого параметра x .

Інформаційні показники якості приймання сигналів мають простий і ясний фізичний зміст і можуть оцінюватися кількісно шляхом вимірювання параметрів законів розподілів амплітуд, фаз і частот сигналів.

Найбільш загальним критерієм оптимальності (якості) виявлення сигналів в статистичній радіотехніці є критерій мінімуму середнього ризику (середньої ціни наслідків помилок [3]). Практичними важливими наслідками цього критерію є критерій Неймана-Пірсона (традиційно застосовується в радіолокації), критерій ідеального спостерігача, критерій мінімуму середньоквадратичної помилки (застосовується у вимірювальній практиці), ваговий критерій.

На практиці широко поширений критерій відношення правдоподібності:

$$l(x) = \frac{P_{C3}(x)}{P_3(x)}, \quad (4)$$

де $l(x)$ – відношення густин розподілу імовірностей однієї й тієї ж реалізації оцінюваного параметра x за двох умов: коли сигнал впливає на приймальний пристрій в сукупності з шумом (завадою) і коли на вході приймача діє тільки шум (завада). При використанні цього критерію роблять припущення, що апіорна ГРІ збігається з функцією правдоподібності. Після порівняння чисельного значення критерію $l(x)$ з встановленим граничним значенням l_0 приймається рішення, яка з гіпотез щодо наявності сигналу в даному процесі є більш правдоподібною.

Застосування критерію відношення правдоподібності практично зводиться до обчислення відношення (4) і порівнянню його значення з порогом, величина якого відповідає заданій імовірності помилкової тривоги. Рішення про наявність корисного сигналу приймається, якщо значення відношення правдоподібності перевищує порогову величину l_0 , в іншому випадку приймається рішення про відсутність сигналу в шумах або завадах.

Слід зазначити, що кореляційна обробка незмінно пов'язана з втратою корисної інформації, що міститься в зміні характеристик закону розподілу оцінюваного параметра корисного сигналу. Іншими словами, кореляційний приймач є оптимальним тільки в енергетичному сенсі; він покращує енергетичне відношення сигнал/шум, але при цьому втрачається корисна інформація про імовірнісні характеристики сигналу. Із зазначеної причини кореляційний приймач не є оптимальним в інформаційному сенсі.

Як показано в [5], узагальненою характеристикою форми закону розподілу є ентропія його ГРІ. Ця характеристика враховує форму ГРІ, тому інформаційно-ентропійний критерій оптимального приймання виду:

$$I(x) = \frac{H_{C3}(x)}{H_3(x)}, \quad (5)$$

є більш універсальним, ніж енергетичний пороговий (заснований на обчисленні кореляційного інтеграла).

В (5) $I(x)$ – відносна кількість інформації, отримана внаслідок обробки сигналу разом з шумом (завадою); $H_{C3}(x)$, $H_3(x)$ – відповідно, ентропії ГРІ $P_{C3}(x)$ і $P_3(x)$.

Пряме вимірювання ГРІ $P_C(x) + P_3(x)$ і $P_3(x)$ і ентропій $H_C(x) + H_3(x)$ дозволяє отримувати корисну інформацію, що міститься в зміні параметрів форми законів розподілів переданих повідомлень.

Таким чином, інформаційно-ентропійний алгоритм оцінки якості маскуванню сигналів у каналах радіозв'язку з зашумленням полягає у вимірі густини імовірностей $P_C(x) + P_3(x)$ і відповідних їм ентропій ГРІ $H_C(x) + H_3(x)$, $H_3(x)$ з подальшим обчисленням відношення правдоподібності і прийняттям рішення про наявність корисного сигналу (або оцінці значення його параметра) шляхом порівняння з пороговим значенням ентропії H_0 .

Інформаційне трактування процесів приймання радіосигналу і оцінювання його параметрів у порівнянні з традиційними статистичними підходами має переваги, які полягають у наступному:

- інформаційний показник якості приймання має простий фізичний зміст і можливість кількісної оцінки шляхом вимірювання імовірнісних характеристик сигналів;
- ентропійно-інформаційні показники якості виявлення і оцінювання сигналів інваріантні до зміни законів розподілів оцінюваного параметра, оскільки дозволяють враховувати вплив форми закону розподілу на якість оцінювання;
- інформаційний підхід до оптимізації якості прийому забезпечує отримання додаткової корисної інформації, що міститься в параметрах закону розподілу оцінюваного параметра, і дозволяє підвищити точність оцінок.

Методика оцінки якості маскуванню сигналів у каналах радіозв'язку

Ідеальні маскувальні завадові сигнали повинні створювати такі умови, за яких апостеріорі, після прийому корисного сигналу, апіорна невизначеність в системі інформаційного забезпечення зберігалася б протягом тривалого часу. Чим більша невизначеність завадового сигналу при заданих обмеженнях, тим менше потенційних можливостей у супротивника для усунення його впливу.

Оцінка якості приймання радіосигналів здійснюється за інформаційно-ентропійним критерієм якості. Відмінністю нового критерію від традиційного критерію відношення правдоподібності є заміна енергетичної процедури оптимального прийому на більш загальну інформаційно-енергетичну процедуру. Інформаційно-ентропійний підхід базується на врахуванні відмінностей статистичних властивостей сигналів і маскувальних завад, а саме відмінності ентропій (форм) законів їх розподілу в технологічній процедурі розрізнення або оцінювання параметрів сигналів на тлі маскувальних завад.

Структурну схему оцінки якості каналу з зашумленням наведено на рис. 1.

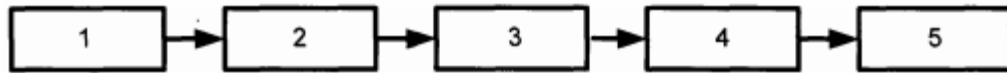


Рис. 1. Структурна схема оцінки якості каналу для фазо-модульованих і частотно-модульованих маскувальних шумових завод:

1 - джерело маскувальної завади; 2 - вимірювальний приймач з частотним (фазовим), амплітудним демодулятором; 3 - вимірювач кореляційних характеристик; 4 - АЦП, 5 - персональний комп'ютер

В блоці 1 формується маскувальна фазо-модульована або частотно-модульована шумова завада, яка випромінюється в навколишній простір за допомогою антени. В блоці 2 прийнята завада демодулюється і формується електричний сигнал, який подається на вимірювач кореляційних характеристик (блок 3). В блоці 3 здійснюється дискретизація за часом прийнятого електричного сигналу, вимірюються рівні сигналу для дискретних моментів часу і будується гістограма густини розподілу імовірності значень електричного маскувального сигналу, яка після аналого-цифрового перетворення в блоці 4 поступає в персональний комп'ютер (блок 5), де обчислюється ентропія закону розподілу значень напруг електричного сигналу завади, ентропія еталонного рівномірного закону розподілу і ентропійний коефіцієнт якості маскувальної завади.

Якщо блок 1 замінити джерелом корисного сигналу, то для оцінки його статистичних властивостей приймають сигнал, здійснюють дискретизацію відліків значень електричного сигналу, вимірюють для всіх дискретних моментів часу рівні напруг електричного сигналу $u_i (i = 1, N)$, будують гістограму закону розподілу значень напруги електричного сигналу $p_i(u_i) (i = 1, N)$, обчислюють з використанням гістограми ентропію H закону розподілу значень напруг електричного сигналу за формулою

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i. \quad (6)$$

Порівняння ентропійних характеристик коефіцієнтів якості η маскувальної частотно-модульованої шумової завади і замаскованого сигналу дозволяє оцінювати якість каналу. При необхідності більш детального аналізу якості з використанням гістограми розраховують другий момент σ_0 закону розподілу значень напруги електричного сигналу або (і) завади за формулою

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2 p_i}. \quad (7)$$

З використанням гістограми розраховують також математичне очікування m натурального логарифма значень напруги електричного сигналу (завади) за формулою

$$m = \sum_{i=1}^N p_i \ln u_i, \quad (8)$$

обчислюють ентропію H^P еталонного релеєвського закону розподілу за формулою

$$H^P = -m + 2 \ln r + \frac{\sigma_0^2}{2r^2}, \quad (9)$$

де $r = \sqrt{2e^{\left[1+m+\frac{1}{2}(c-\sigma_0^2)\right]}}$ - параметр релеєвського закону розподілу; $c = 0,577$ - постійна Ейлера.

Ентропійний коефіцієнт якості η^0 маскувальної завади обчислюють за формулою

$$\eta^0 = \frac{e^H}{e^{H^p}} = e^{\left[H+m-2\ln r - \frac{\sigma_0^2}{2r^2} \right]}. \quad (10)$$

Отримане значення η^0 ентропійного коефіцієнта якості використовують для оцінки якості маскувальної завади в конкретному каналі.

Висновки

Інформаційно-ентропійний критерій якості маскувальної завади у каналах радіозв'язку має простий фізичний зміст і можливість кількісної оцінки шляхом вимірювання імовірнісних характеристик сигналів.

Збільшення апостеріорної корисної інформації досягається шляхом зменшення невизначеності щодо ентропії густини розподілу імовірності корисного параметра сигналу.

Розглянутий спосіб оцінки якості маскування справедливий для оцінки різних видів маскувальних заводових сигналів.

Введення ентропії як характеристики якості маскувальних заводових сигналів дозволяє оцінювати потенційні можливості завод незалежно від способів їх обробки в каналах зв'язку. Це доводить ефективність використання імовірнісних характеристик для оцінки якості маскувальних заводових сигналів в каналі зв'язку.

Список використаної літератури

1. Добыкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн/ В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Шустов; Под общ. ред. А. И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2009. – 360 с.
2. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А.И. Куприянов, Л.Н. Шустов. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.
3. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
4. Худяков Г. И. Прикладная теория информации. Информационная теория радиотехнических систем: Учеб. пособие. – СПб: Изд-во СЗТУ, 2011. – 297 с.
5. Новицкий П.В., Зюграф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

Надійшла: 15.05.2018

Рецензент: д.т.н. Вишнівський В.В.