

УДК 621.396

С.В. Козелков, Д.П. Пашков, М.В. Коробчинський

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ В РАДІОМЕРЕЖІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Запропоновано один із шляхів підвищення завадостійкості в радіомережі передачі інформації в системі організації зв'язку в безпілотних літальних апаратах.

Вступ

Найважливішим фактором при організації зв'язку в системі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які необхідно брати до уваги, коли оцінюється робота ліній зв'язку перспективних діапазонів, є вплив тропосферних ефектів на енергетику радіосигналу [1]. Особливо актуальними є фундаментальні та прикладні дослідження радіодіапазонів вище 10 ГГц [2, 3]. Рядом країн проводяться дослідження із впливу тропосферного шару на якість переданої інформації по каналах зв'язку. Прикладом може служити ряд програм, у яких проведені експерименти, пов'язані з вивченням поширення радіохвиль [3, 4]. Ці вимірювання становлять інтерес для конструювання радіосистем передачі інформації (РСП), що працюють на дуже високих частотах.

Аналіз літератури

Аналіз літератури [3, 4] показав, що як на сучасних, так і на знов створюваних РСП, які працюють у КХЧ діапазоні, необхідно враховувати впливи тропосферного шару і по можливості більш ефективно знижувати даний вплив, внаслідок чого підвищувати якість приймального сигналу. Особливий інтерес викликають дослідження впливу частотно-селективних завмирань на зміни фази радіосигналу, що пройшов тропосферну ділянку атмосферного шару Землі [3]. При цьому доцільно для підвищення завадостійкості РСП застосовувати алгоритм адаптації при прийманні й обробці сигналу, який пройшов тропосферний шар Землі з частотно-селективними завмираннями [4]. Одним з методів "боротьби" обліку частотно-селективних завмирань є розробка алгоритмів завадостійких кодів, що дозволяють найбільш ефективно використовувати властивості когерентного приймання.

Мета статті – розробка пропозиції щодо завадостійкого кодування в радіоканалах мережі БПЛА.

Основний матеріал

Найбільш розповсюджені і широко використовуються фазоманіпульовані шумоподібні сигнали (ФМ ШПС) [4]. Однак, як і будь-яка РС, ПІ має не-

доліки. Найбільш істотним недоліком радіоканалів із ФМ ШПС при впливі структурних завад є необхідність мати велике значення бази сигналу $V = T_c F_c$, що досягає значень тисяч і декількох десятків тисяч, наслідком чого стає низька швидкість передачі інформації [3]:

$$V_T = 1/F_1 = F_c/V,$$

де $F_1 = 1/T_c$ – частота надходження інформаційних символів;

F_c та T_c – тривалість і смуга частот, яка займається сигналом.

Підвищення ефективності систем у цьому випадку досягається шляхом використання завадостійкого кодування за рахунок зменшення величини бази без втрат у завадостійкості [2, 5]. При цьому виграш у швидкості передачі інформації чисельно дорівнює енергетичному виграшеві від кодування [3] і для каналів з гаусівським шумом складає 5...10 дБ, а для каналів зі структурною перешкодою – і того більше.

Грунтуючись на аналізі сучасного стану теорії і практики завадостійкого кодування, можна зробити висновок про те, що для каналів передачі інформації у БПЛА зі складними сигналами найбільший виграш досягається при використанні каскадних схем кодування першого порядку [6]. Як зовнішній код у них використовуються коди Ріда-Соломона (РС-коди), а як внутрішній – згортувальні коди з "м'яким" алгоритмом декодування Вітербі або короткі блокові [3].

Каскадні коди є одним з найбільш ефективних способів подолання "катастрофічної" складності реалізації завадостійких кодів з великою довжиною кодового слова. У таких кодах використовується кілька рівнів завадостійкого кодування. Перший код називається зовнішнім, а всі наступні – внутрішніми. Кількість внутрішніх кодів визначає порядок каскадного коду. Так, у каскадних кодах першого порядку, що в основному і знаходять широке застосування, є один зовнішній і один внутрішній коди.

Основною особливістю каскадного коду є необхідність узгодження всіх ступенів кодування між собою, яка полягає у виборі параметрів кодів, з ура-

хуванням виправляючих і виявляючих здатностей сусідніх кодів. Так, для випадку каскадного коду першого порядку з блоковими зовнішнім (n_1, k_1, d_1) і внутрішнім (n_2, k_2, d_2) кодами при перевищенні кількості похибок у дискретному каналі виправляючих можливостей внутрішнього коду їх підсумкова кількість на виході внутрішнього декодера буде не менше d_2 . Ці похибки охоплюють усе кодове слово, тобто на виході внутрішнього декодера виникне пакет похибок довжиною k_2 символів. Для його виправлення необхідно, щоб зовнішній код мав потенційну можливість здійснення цієї операції.

У зв'язку з цим як зовнішній код використовують коди, що ефективно протидіють пакетам похибок: коди Файра, згортувальні коди та ін. Однак найбільший вигравш забезпечують недвійкові БЧХ коди – коди Ріда-Соломона з алфавітом над полем $GF(2^m)$, для яких m – кількість двійкових символів, об'єднаних в один M -й. Висока ефективність кодів Ріда-Соломона пояснюється можливістю виявлення і виправлення пакетів похибок у двійковому каналі, максимально можливою кодовою відстанню і високою відносною швидкістю. Для випадку, наведеного вище, інформаційна частина слова внутрішнього коду повинна дорівнювати

$$k_2 = mt_{b1},$$

де t_{b1} – кількість похибок, що виправляються зовнішнім кодом.

Каскадний код першого порядку з зовнішнім РС-кодом над полем $GF(2^m)$ характеризується наступними показниками:

довжина кодового слова N і кількість інформаційних двійкових символів K у ньому дорівнюють відповідно

$$N = n_1 m \quad \text{та} \quad K = k_1 m;$$

кодова відстань D каскадного коду завжди більше кодової відстані d_1 будь-якого коду, що входить у каскадну схему;

відносна швидкість каскадного коду дорівнює

$$\Gamma_{kk} = \Gamma_{k1} \Gamma_{k2};$$

складність реалізації каскадного коду оцінюється як алгебраїчна сума величин, що характеризують складність реалізації кодів, які входять у нього;

імовірність похибки на виході зовнішнього декодера визначається співвідношенням

$$P_6 = \frac{n_1 + 1}{2n_1} \times$$

$$\times \left[d_1 \sum_{i=t_{b1}+1}^{d_1} C_{n1}^i P_s^i (1 - P_s)^{n1-i} + \sum_{i=d_1}^{n1} i C_{n1}^i P_s^i (1 - P_s)^{n1-i} \right], \quad (1)$$

де C_n^i – кількість сполучень з n по i ;

P_s – імовірність похибки на виході внутрішнього декодера.

До негативних наслідків від застосування завадостійкого кодування поряд з ускладненням апаратної реалізації вузлів мережі й абонентів варто віднести збільшення часу обробки інформації, який для каскадного коду не може бути менше тривалості одного кодового слова.

Кодування інформації каскадним кодом із внутрішнім блоковим здійснюється наступним чином. Вхідна інформаційна послідовність розбивається на блоки по $k_1 m$ двійкових символів, які перетворюються в блоки по $k_1 M$ -х символів. Над цими блоками здійснюється операція кодування РС-кодом, тобто перетворення їх у n_1 -розрядні M -ті кодові слова з наступним представленням у вигляді $n_1 m$ -розрядного двійкового блоку. Цей блок розбивається на k_2 -розрядні двійкові слова, що надходять у внутрішній кодер, який видає в дискретний канал послідовність n_2 -розрядних двійкових кодових слів. Декодування здійснюється у зворотному порядку. Послідовність двійкових символів з виходу демодулятора надходить у декодер внутрішнього коду, де відбувається виправлення похибок і виділення інформаційної частини слів. Потім отримані двійкові символи поєднуються в M -ті і надходять у зовнішній декодер, де відбувається остаточне усунення надмірності, виправлення похибок, перетворення у двійковий вигляд і видача інформації споживачеві.

Використовуючи як внутрішні короткі блокові коди, можна одержати розумні швидкості кодування, що лежать у межах $0,5 < \Gamma_{kk} < 0,75$. Якщо декодувати ці коди за допомогою деякого алгоритму, близького до декодування за максимумом правдоподібності, то можна одержати чудові характеристики системи. Друге достоїнство полягає в тому, що структура такої каскадної схеми полегшує розпаралювання операцій при декодуванні, знижуючи час обробки інформації в приймальному пристрої.

Досить ефективними з цього погляду є схеми з найпростішими внутрішніми кодами з перевіркою на парність $(k_2 + 1, k_2)$ і кодовою відстанню $d_2 = 2$, що виявляють усі непарні похибки, і зовнішніми кодами Ріда-Соломона, що виправляють $d_1 - 1$ стирань.

При використанні як внутрішніх так і згортувальних кодів вихідна послідовність зовнішнього кодера безупинно кодується без розбиття на блоки

внутрішнім кодом, а вихідна послідовність дискретного каналу безупинно декодується внутрішнім декодером. Це приводить до того, що пакети похибок не такуються із символами зовнішнього коду і можуть уразити відразу декілька М-их символів. Проте висока ефективність згортувальних кодів порівняно з короткими блоковими дозволяє їх використовувати у складі каскадних схем.

Декодування може здійснюватися як "твердим", так і "м'якими" алгоритмами прийняття рішень у внутрішньому і зовнішньому декодерах. Найбільш ефективними при цьому є схеми, у яких внутрішній декодер реалізує "м'яке" рішення на основі квантування вихідного сигналу демодулятора, а зовнішній – здійснює відновлення стирань окремих кодів слів, виконаних внутрішнім декодером.

Імовірність похибки одного біта інформації для згортувальних кодів визначається за формулою

$$P_0 = \frac{1}{r_{св}} \sum_{k=d_f}^{\infty} \frac{1}{k} W_k P_k, \quad (2)$$

де P_k – імовірність вибору при декодуванні хибного шляху ваги k ;

W_k – кількість всіх можливих хибних шляхів ваги k .

У [3] наведені значення коефіцієнтів W_k для кращих з відомих згортувальних кодів, а також показано, що для визначення імовірності похибки при згортувальному кодуванні досить використати перші п'ять доданків нескінченної суми. Імовірність похибки P_k для твердого розв'язання визначається за формулою [1, 2]

$$P_k = \begin{cases} 0,5 C_n^{k/2} P_0^{k/2} (1 - P_0^{k/2}) + \sum_{i=k/2+1}^n C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i}, & k - \text{парне}; \\ \sum_{i=(k+1)/2}^n C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i}, & k - \text{непарне}, \end{cases} \quad (3)$$

а для м'якого розв'язання – за формулою

$$P_k = 1 - F(\sqrt{k} h), \quad (4)$$

де $F(x)$ – інтеграл імовірності.

Застосування каскадного коду в РС ПП БПЛА має ряд особливостей, що обумовлюють велику кількість варіантів побудови коду.

За способом обробки у вузлах розрізняють три варіанти:

без обробки, коли пакет кодується каскадним кодом абонентом-джерелом інформації, а декодується абонентом-споживачем інформації, за рахунок чого значно скорочується час обробки у вузлах мережі, але знижується завадостійкість;

з повною обробкою, коли в кожному вузлі здійснюється повне декодування каскадного коду з наступним кодуванням і подальшою передачею по мережі;

з частковою обробкою у вузлах мережі і повною обробкою в пункті приймання, коли в кожному вузлі мережі здійснюється декодування тільки внутрішнього коду з наступним кодуванням і подальшою передачею.

За видом обробки каскадного коду в декодері розрізняють:

виправлення похибок внутрішнім і зовнішнім кодами;

виправлення похибок внутрішнім, а виявлення – зовнішнім кодами;

виявлення похибок внутрішнім, а виправлення – зовнішнім кодами;

виявлення похибок і внутрішнім, і зовнішнім кодом;

часткове виправлення похибок внутрішнім кодом і формування стирань з виправленням стирань зовнішнім кодом.

Висновок

Таким чином, остаточний вибір варіанта обробки каскадного коду може бути здійснений тільки разом з визначенням протоколу підтвердження і зворотного зв'язку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы. – Минск.: Вышэйшая школа, 1988. – 369 с.
2. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиостроительств. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 364 с.
4. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
5. Бондарев В.Н., Трестер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. – Х.: Конус, 2001. – 398 с.

Надійшла 28.09.2005

Рецензент: д-р техн. наук професор Ю.В. Стасев, Харківський університет Повітряних Сил.