

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”, Полтава

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛІНІЙНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ РОЗШИРЕННЯ СПЕКТРА, СФОРМОВАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕГІСТРА ЗСУВУ

У статті проведена оцінка властивостей лінійних кодів розширення спектра, які визначають завадостійкість та імітостійкість широкосмугових мереж зв'язку та забезпечують можливість реалізації в асинхронно-адресних мережах М-ічної передачі даних, а також регулюють рівень гнучкості варіювання між швидкістю передачі даних та енергетичною скритністю.

адресні системи зв'язку, шумоподібні сигнали, М-последовності, последовності Голда і Касамі

Постановка проблеми

Одним з магістральних напрямів розвитку сучасного радіозв'язку є впровадження асинхронно-адресних систем зв'язку (ААСЗ), ключовим елементом яких є сигнали з розширенням спектра або шумоподібні сигнали (ШПС). Такі характеристики ААСЗ, як імовірність нав'язування помилкових сигналів, завадостійкість до структурної завади, гнучке та ефективне використання частотного ресурсу і простота цифрової обробки сигналів визначаються властивостями CDMA-кодів, що використовуються для формування ШПС. До таких властивостей відносяться: значення довжини кодової послідовності, яке визначає можливість використання швидких цифрових алгоритмів обробки ШПС; розмір ансамблю кодів та складність аналізу їх структури, що впливають на стійкість ААСЗ до нав'язування помилкових сигналів; взаємні кореляції ансамблю сигналів та інші характеристики кореляційних функцій, які впливають на рівень системних завад при багатостанційному доступі з кодовим розділенням каналів. Крім того, на можливість гнучкого використання наданої смуги частот впливає множина значень довжини коду, що є тотожною коефіцієнту розширення спектра ШПС.

Аналіз літературних джерел

На сьогоднішній день у переважній більшості наукових робіт [1,3,5] аналіз CDMA-кодів проводиться за показниками якості, які надають можливості оцінити лише кореляційні і ансамблеві характеристики адресних послідовностей. Але такий підхід не в повній мірі відповідає зазначеним вище

сучасним вимогам до властивостей кодів розширення спектра.

Мета статті

Метою статті є дослідження властивостей такої сукупності лінійних послідовностей, як М-последовності, последовності Голда і Касамі, які мають достатньо повний математичний опис і широко використовуються на практиці. На основі проведеного аналізу буде зроблений висновок про доцільність використання зазначених послідовностей у якості адресних кодів у сучасних CDMA-мережах.

1. Формування М-последовностей

Розглянемо й оцінімо зазначені властивості адресних кодів, які формуються за допомогою лінійного регістру зсуву.

М-последовності набули значного поширення завдяки “ідеальним” автокореляційним властивостям та простоті формування. Побудову таких кодових послідовностей здійснюють у розширеному полі Галуа $GF(2^n)$, використовуючи регістр зсуву [1]. Закон формування М-последовностей записують наступним чином [2]:

$$a = h_1 a_{l-1} \oplus h_2 a_{l-2} \oplus \dots \oplus h_n a_{l-n},$$

де a – примітивний, незвідний поліном степеня n над простим полем Галуа $GF(2^n)$;

n – розмірність регістра зсуву та значення коефіцієнта розширення простого поля Галуа $GF(2^n)$;

$$h_i \in \{0,1\}.$$

Довжина М-последовності набуває таких значень [1, 2]:

$$L = 2^n - 1. \quad (1)$$

Періодична автокореляційна функція (ПФАК) M -послідовностей має “ідеальний” вигляд, а бічний пік цієї функції набуває єдиного значення [3]:

$$|R_{\text{іііі}}(m)| = 1,$$

де $m = [0, 1, 2, \dots, L-1]$ – номер циклічного зсуву;
 L – довжина послідовності.

Розмір ансамблю M -послідовностей без урахування можливих циклічних зсувів визначається такою формулою [1, 3]:

$$\dot{L} = \varphi(L)/n,$$

де $\varphi(L)$ – функція Ейлера.

Суттєвим недоліком M -послідовностей є погані значення функції взаємної кореляції [2]. Але існують пари M -послідовностей періодична взаємкореляційна функція (ПФВК) яких набуває трьох наступних значень [1]:

$$R_{\text{іііі}}(m) = \begin{cases} -1, \\ -1 - 2^{(n+2)/2}, \text{ при } n \equiv 0(\text{mod } 2) \\ 1 + 2^{(n+2)/2} - 2 \end{cases}$$

або

$$R_{\text{іііі}}(m) = \begin{cases} -1, \\ -1 - 2^{(n+2)/2}, \text{ при } n \neq 0(\text{mod } 2). \\ 1 + 2^{(n+2)/2} - 2 \end{cases} \quad (2)$$

На основі мультиплікативного об’єднання пари таких M -послідовностей, які ще мають назву “переважної пари”, формуються послідовності Голда [4]. Довжина кодів Голда дорівнює довжині M -послідовностей, а ПФАК та ПФВК набувають значень згідно з виразом (2).

Кореляційні властивості таких послідовностей не вважаються задовільними [2]. Розмір ансамблю послідовностей Голда обчислюють за такою формулою [1,4]:

$$M = \dot{A} \times (L + 2),$$

де A – кількість переважних пар M -послідовностей довжини L .

За рахунок мультиплікативного об’єднання M -послідовностей, які відповідають певним умовам, можна побудувати малу та велику множини послідовностей Касамі [3].

Для послідовностей, що належать малій множині, ПФАК набуває таких значень [3]:

$$R_{\text{іііі}}(m) = \begin{cases} -1, \\ 1 + 2^{n/2} - 2, \\ -1 - 2^{n/2}, \end{cases} \quad (3)$$

де $L = 2^n - 1$ – довжина послідовності.

Із (3) випливає, що максимальне значення ПФАК і ПФВК для послідовностей Касамі майже у двічі менше, ніж для послідовностей Голда. Мала множина послідовностей є оптимальною [3]. У той же час розмір ансамблю послідовностей, що утворюють малу множину послідовностей Касамі, менший і обчислюється за такою формулою [3]:

$$M = \dot{A}_\text{е}^1 \times (L + 1)^{1/2},$$

де $\dot{A}_\text{е}^1$ – кількість пар M -послідовностей періоду $L = 2^n - 1$ та $L = 2^{n/2} - 1$, на основі яких формується мала множина послідовностей Касамі;
 $n \equiv 0(\text{mod } 2)$.

Бічні піки авто- і взаємкореляційних послідовностей з великої множини Касамі набувають наступних значень [1]:

$$R_{\text{іііі}}(m) = \begin{cases} -1, \\ -1 \pm 2^{(n+2)/2}, \\ -1 \pm 2^{n/2}. \end{cases}$$

Розмір ансамблю послідовностей з великої множини послідовностей Касамі визначається за формулою [5, 6]:

$$M = \dot{A}_\text{к}^2 \times \begin{cases} 2^{n/2}(2^n + 1), \text{ якщо } n \equiv 2(\text{mod } 4), \\ 2^{3n/2}, \text{ якщо } n \equiv 0(\text{mod } 4), \end{cases}$$

де $\dot{A}_\text{к}^2$ – кількість груп M -послідовностей періоду $L = 2^n - 1$, $L = 2^{n/2} - 1$ та $L = 2^{(2+n)/2} - 1$, на основі яких формується велика множина послідовностей Касамі.

Велика множина послідовностей Касамі включає в себе малу множину послідовностей Касамі та множину послідовностей Голда, а максимальне значення бічного піка кореляційних функцій таке саме, як і в послідовностей Голда [5].

З огляду на те, що формування M -послідовностей відбувається за допомогою регістра зсуву, для визначення закону побудови необхідно і достатньо знати всі зворотні зв’язки регістра зсуву, які визначає поліном a [1]. Для цього необхідно перехопити $2n$ слідуючих один за одним символів, тому структурна скритність цих послідовностей [6] дорівнює:

$$S_{\text{сс}}^{(1)} = 2n / (2^n - 1)$$

Наприклад, для M -послідовностей довжиною $L=1023$, структурна скритність дорівнює $S_{\text{сс}}^{(1)} = 0,02$.

Отже, розкрити закон формування відповідних сигналів у реальному часі не становить великих труднощів. А зі зменшенням швидкості передавання інформації та кількості елементів у сигналі

можливості щодо подавлення таких радіосистем оптимальними перешкодами ще більше зростають [2].

2. Оцінка структурної скритності послідовностей Голда і Касамі

Для оцінки структурної скритності послідовностей Голда і Касамі слід скористатися

узагальнюючим показником оцінки структурної скритності – $S_{cc}^{(2)}$. Значення розміру ансамблю M -послідовностей, послідовностей Голда, малої і великої множин Касамі наведено у табл.1.

Зауважимо, що наведене в табл.1 значення розміру ансамблю для адресних кодів Голда обчислене без урахування кількості переважних пар M -послідовностей певної довжини.

Таблиця 1

Розмір ансамблю M -послідовностей, послідовностей Голда та Касамі						
Тип послідовності \ L	31	63	127	255	511	1023
M -послідовність	6	6	18	16	48	60
Послідовність Голда	$A \times 33$	$A \times 65$	$A \times 129$	–	$A \times 513$	$A \times 1025$
Мала множина послідовностей Касамі	–	$A_k^{(1)} \times 8$	–	$A_k^{(1)} \times 16$	–	$A_k^{(1)} \times 32$
Велика множина послідовностей Касамі	–	$A_k^{(2)} \times 519$	–	$A_k^{(2)} \times 4111$	–	$A_k^{(2)} \times 32799$

де A , $A_k^{(1)}$, $A_k^{(2)}$ – кількість пар M -послідовностей для певного значення довжини L , які можна використовувати для синтезу послідовностей Голда, малої множини Касамі та великої множини Касамі, відповідно.

Для обробки розглянутих послідовностей неможливо використовувати алгоритми швидкого перетворення, оскільки їхня довжина є простим

числом (1), а множина значень їхньої довжини L^T є вкрай малочисельною (табл.2).

Таблиця 2

Значення довжини лінійних кодів розширення спектра				
Код \ Діапазон L	15 – 127	127 – 511	511 – 1023	1023 – 8191
M -послідовність	4	3	2	4
Послідовність Голда	3	2	2	3
Послідовність Касамі	2	2	1	2

Висновки

З приведеного вище матеріалу можна зробити наступний висновок – лінійні послідовності, які формуються за допомогою регістру зсуву мають добрі кореляційні властивості у порівнянні з іншими послідовностями розширення спектра (особливо з нелінійними), але у той же час, вони мають незадовільні значення за іншими показниками якості. Тому їх застосування у сучасних системах радіозв'язку є достатньо обмеженим. Сьогодні M -послідовності найширше застосовуються в системах визначення місця розташування (GPS). Використовують їх у системах стільникового широкосмугового зв'язку IS-95(CDMA-one), але тільки у якості ідентифікатора базових станцій та для здійснення аутентифікації користувачів. Послідовності великої множини Касамі є одними з основних кандидатів на використання у якості скремблінг-кодів в системах широкосмугового зв'язку W-CDMA [1].

Список літератури

1. H. Esmail Dinan, Brian Jabbar Spreading Codes for Direct Sequence CDMA and Wideband CDMA Cellular Networks // IEEE Communication Magazine. – 1998, September. – P. 48-54.
2. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1970. – 376 с.
3. Свєрдлик М.Б. Оптимальные дискретные сигналы. – М.: Сов. радио, 1975. – 200 с.
4. Сарватє Д.В., Персли М.Б. Взаимно-корреляционные свойства псевдослучайных и родственных последовательностей. // ТИИЭР, т.68. – №5. 1980. – 59-89 с.
5. Поставной В.И. Теория передачи сигналов. – М: МО СССР.– 1985. – 261 с.
6. Горбенко И.Д., Стасєв Ю.В., Замула А.А. Теория дискретных сигналов. Ч. 1. Ортогональные дискретные сигналы. – Х: МО СССР, 1988. – 118 с.