

УДК 621.396:006; 620.179.15:004.421.2

**АЛГОРИТМ ТАКТОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ
ЦИФРОВОГО РАДІОМОДЕМА НА ОСНОВІ ШПФ**

**АЛГОРИТМ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ
ЦИФРОВОГО РАДІОМОДЕМА НА ОСНОВЕ БПФ**

**ALGORITHM FOR CLOCK SYNCHRONIZATION
BETWEEN DIGITAL RADIO MODEMS BASED FFT**

С.Л. Волков, О.О. Скопа

Анотація. У статті показана доцільність використання принципів ШПФ при розробці ефективних обчислювальних алгоритмів, які засновані на принципі мінімуму перехідних завад у вільних каналах, для розробки систем тактової синхронізації цифрових багатоканальних радіомодемів.

Ключові слова: синхронізація, модем, ШПФ, завада, канал

Аннотация. В статье показана целесообразность использования принципов БПФ при разработке эффективных вычислительных алгоритмов, основанных на принципе минимума переходных помех в свободных каналах, для построения систем тактовой синхронизации цифровых многоканальных радиомодемів.

Ключевые слова: синхронизация, модем, БПФ, помеха, канал

Annotation. It is rotined in the article, that at development of effective computational algorithms of time synchronization for multichannel radiomodems, it is possible to apply principles FFT. These principles utilized an idea about a minimum of cross-talks in the free ductings.

Keywords: synchronization, modem, FFT, hindrance, channel

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Для забезпечення правильного прийому переданих інформаційних сигналів в захищених телеметричних системах доводиться вирішувати різноманітні завдання синхронізації. Так, при використанні радіозв'язку, який у ряді випадків є єдиним засобом передачі телеметричної інформації, доводиться вирішувати задачу встановлення та підтримки певних фазових співвідношень між сигналами що виробляються на передачі та прийомі. При цьому, якщо повідомлення має цифрову структуру, найбільш доцільним є застосування багаточастотних (багатоканальних) модемів з двократною відносною фазовою модуляцією та ортогональними канальними сигналами [1...4]. Разом з тим, саме радіоканал понад усе схильний до впливу як випадкових, так і навмисних зосереджених або широкосмугових завад та перешкод. У зв'язку з цим, достатньо часто, в багатоканальних модемах з метою поліпшення ряду їх технічних характеристик, наприклад, швидкості входження демодулятора в синхронний стан, по несучих частотах на межах посилок вводиться додаткова фазова маніпуляція на 45° [4]. Хоча вказана додаткова різниця фаз інформації не несе, спектральні властивості групового сигналу модему поліпшуються, позитивно впливаючи на роботу допоміжних пристроїв демодулятора [4...6]. Проте зазначене не дозволяє успішно боротися з впливом шумів та навмисних перешкод в каналі зв'язку телеметричної системи як на якість інформаційного сигналу [7...9], так і на забезпечення достатньо надійної роботи систем синхронізації в багатоканальних модемах [10, 11]. Виходячи з цього, **постановкою завдання та метою статті** є впровадження ідеї використання принципів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) при розробці ефективних обчислювальних алгоритмів, заснованих на принципі мінімуму перехідних завад у вільних каналах, для побудови систем тактової синхронізації цифрових багатоканальних радіомодемів, що, в принципі, може вирішити вище вказані проблеми. Зазначена ідея була вперше запропонована Байковою А.Т. в [12].

Невирішена частина загальної проблеми. На сьогодні відомо достатньо багато робіт, які присвячені проблемам синхронізації цифрових багатоканаль-

них радіомодемів по частоті несучого коливання, але більшість з них не враховує повною мірою характерних особливостей певних радіоканалів (наприклад таких, які використовуються у захищених телеметричних системах) як по енергетиці, так і по частотній невизначеності сигналу, що приймається. Вплив «сусідніх радіоканалів» на процедури синхронізації у відомих роботах, як правило, не розглядається. Т.ч. використання принципів ШПФ при розробці систем тактової синхронізації з врахуванням інформації, яку несуть вільні канали у вигляді перехідних завад, є достатньо актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як показав аналіз доступних літературних джерел, питанням побудови ефективних методик та алгоритмів обробки радіосигналів, з метою отримання оцінок їх параметрів, присвячені роботи Д.Д. Кловського, В.Г. Карташевського, А.І. Тяжева, Б.І. Миколаєва. Слід також відзначити роботи С.Н. Елісеєва, А.І. Тяжева, Е.А. Акчуріна та ін., які присвячені питанням мінімізації обчислювальної складності алгоритмів. У працях В.В. Шахгільдяна, В.Л. Карякина та інших вчених розроблені теоретичні основи побудови систем синхронізації імпульсних сигналів на основі систем фазового автопідстроювання частоти. Проте отримані ними результати не можуть бути безпосередньо застосовані до задачі, яка винесена в заголовок статті. Ідея пошуку алгоритмів, які дозволяють формувати незалежні (інваріантні) по відношенню один до одного оцінки частотного зрушення та тактової синхронізації висловлювалися в роботах П.О. Боргессона, Дж. Санделла, Дж. Ван де Біка, У. Тьюрелі, Х. Ліу, М. Злотовського, Р. Регианіні та М. Луїса, проте вони припускають використання спеціалізованих сигналів або «порожніх» каналів, які мають піднесучу частоту у складі OFDM сигналу (від *англ. Orthogonal frequency-division multiplexing – Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів*).

Виклад основного матеріалу. Розглянемо формування вимірювальних даних у сучасних цифрових телеметричних системах. Загалом існують три технології: по запиту з пункту управління; за наперед заданим часом; по зміні вимірювальної величини більш ніж задане значення [13]. Таким чином, канали

зв'язку телеметричної системи не задіяні постійно, тобто деякий час дані по ним не передаються і канали стають вільними. Наявність таких каналів дає можливість використання відомого методу тактової синхронізації багатоканальних модемів за принципом мінімуму перехідних завад у вільних каналах [7...11]. Цей метод полягає в обчисленні в кожному такті перехідних завад, рівних по величині функції кореляції групового сигналу з відповідними синфазними і квадратурними опорними сигналами на двох інтервалах інтеграції, рівних по величині інтервалу ортогональності і зрушених один щодо одного на величину захисного інтервалу, і зрушенні в наступному такті інтервалу інтеграції у напрямі того інтервалу, де було обчислено менше значення перехідних завад.

Розглянемо випадок Q -канального модему. При цьому нехай з Q каналів інформаційними є тільки S , а останні $Q-S$ каналів – вільні. Множину вільних каналів позначимо через E_{Q-S} .

Нехай опорними сигналами є відрізки гармонійних коливань, що є гармоніками основної частоти Ω . Припустимо, що частота дискретизації групового сигналу дорівнює F_d . На інтервалі ортогональності, який дорівнює періоду основної частоти, уміщається $R = \frac{F_d}{\Omega}$ відліків групового сигналу.

Значення перехідних завад, які виникають в результаті розсинхронізації модему, обчислюватимемо у M вільних каналах з номерами, рівними $P_k = \frac{kR}{N}$, де: N – ціле та кратне R ; k – приймає такі M значень з множини цілих $(0, 1, \dots, N-1)$, щоб виконувалася умова: $P_k \in E_{Q-S}$.

Перехідна завада в каналі з номером P_k , обчислювана на інтервалі, рівному інтервалу ортогональності, дорівнює сумі абсолютних значень функції кореляції або скалярних творів R -точкової послідовності групового сигналу $\{x_n\}$ з послідовностями відліків синфазної та квадратурної складових P_k -канального опорного сигналу. Т.ч., потрібно обчислити:

$$\left. \begin{aligned} X_{P_k}^{\text{синф}} &= \sum_{n=0}^{R-1} x_n \cos \frac{2\pi \cdot \Omega}{F_d} P_k n \\ X_{P_k}^{\text{квадр}} &= \sum_{n=0}^{R-1} x_n \sin \frac{2\pi \cdot \Omega}{F_d} P_k n \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де: $2\pi \cdot \Omega P_k$ – кругова частота несучої P_k -го каналу; $\frac{n}{F_d}$ – дискретний час, кратний періоду частоти дискретизації групового сигналу.

Тоді перехідна завада в P_k -му каналі буде дорівнювати:

$$Y_{P_k} = |X_{P_k}^{\text{синф}}| + |X_{P_k}^{\text{квадр}}|.$$

Зауважимо, що тут не розглядається статистичне усереднювання та усереднювання по каналах, оскільки для виведення бажаного алгоритму це не є принциповим.

Представимо пару чисел $X_{P_k}^{\text{синф}}$ і $X_{P_k}^{\text{квадр}}$ у вигляді вектора:

$$X_{P_k} = X_{P_k}^{\text{синф}} + jX_{P_k}^{\text{квадр}}. \quad (2)$$

Підставляючи (1) у (2), отримуємо:

$$X_{P_k} = \sum_{n=0}^{R-1} x_n \cos \frac{2\pi \cdot \Omega}{F_d} P_k n + j \sum_{n=0}^{R-1} x_n \sin \frac{2\pi \cdot \Omega}{F_d} P_k n = \sum_{n=0}^{R-1} x_n e^{j \frac{2\pi \cdot \Omega}{F_d} P_k n} = \sum_{n=0}^{R-1} x_n e^{j \frac{2\pi \cdot kn}{N}}.$$

Враховуючи періодичність функції $e^{j \frac{2\pi i}{N}}$ з періодом у N відліків, можемо записати:

$$X_{P_k} = \sum_{n_1=0}^{R-1} \left(\sum_{n_2=0}^{\frac{R-1}{N}} x_{\frac{R}{N}(n_1+n_2)} \right) + e^{j \frac{2\pi \cdot kn_1}{N}}.$$

Т.ч., як бачимо, обчислення скалярних добутків (1) звелось до обчислення N -точкового дискретного перетворення Фур'є послідовності:

$$z_{n_1} = \sum_{n_2=0}^{\frac{R-1}{N}} x_{\frac{R}{N}(n_1+n_2)}, \quad n_1 = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3)$$

Підрахуємо кількість арифметичних операцій, потрібних для реалізації отриманого алгоритму на тривалості однієї послідовності. Ця кількість визначається

числом операцій, потрібних для формування N -точкової послідовності відповідно до виразу (3) і обчислення N -точкового ШПФ дійсної послідовності. Формування послідовності (3) вимагає виконання $\left(\frac{R}{N} - 1\right)N = R - N$ операцій складання. Нехай алгоритм ШПФ вимагає виконання $Y_{ШПФ}$ множень та $C_{ШПФ}$ додавань. Тоді шукане число операцій буде:

$$C_n = R - N + C_{ШПФ} \quad (4)$$

додавань та

$$Y_n = Y_{ШПФ} \quad (5)$$

множень.

З [8, 12] та інших джерел відомий алгоритм обчислення перехідних завад в цифровому багатоканальному модемі. Він припускає представлення групового сигналу у вигляді синфазної та квадратурної послідовностей по L відліків, де L – ціле число на яке ділиться без остачі число R . Формування квадратурної та синфазної послідовностей відліків вимагає виконання $2\left(\frac{R}{L} - 1\right) = 2(R - L)$ операцій складання.

Обчислення коефіцієнтів кореляції реалізується перемноженням відліків цих послідовностей з M косинусними та M синусними опорними сигналами, представленими також L відліками. Це вимагає виконання $2ML$ множень та $2M(L - 1)$ складань. Звідси, для реалізації алгоритму, потрібно

$$C_u = 2(R + ML - L - M) \quad (6)$$

додавань та

$$Y_u = 2ML \quad (7)$$

множень.

Для прикладу (див. [12]) розглянемо багатоканальний модем з $Q = 72$ стосовно вище викладених міркувань. У цьому випадку отримаємо: $S = 45$, $E_{Q-S} = (0...12, 30...32, 40...42, 64...71)$, $\Omega = 4$ кГц, $F_d = 576$ кГц, $M = 3$, $L = 9$, $R = 144$.

Як вільні канали, в яких обчислюється перехідна завада, виберемо канали з

номерама $P_k = \frac{144}{N}k$, де покладемо $N = 9$, $k = 0, 2, 4$. Відзначимо, що $P_k \in E_{Q-S}$.

Для реалізації 9-точкового ШПФ використовуємо алгоритм L_1 (рис. 1), що вимагає всього 8 множень та 36 складань. Перевага розглянутого алгоритму тактової синхронізації, що використовує принцип ШПФ, очевидна.

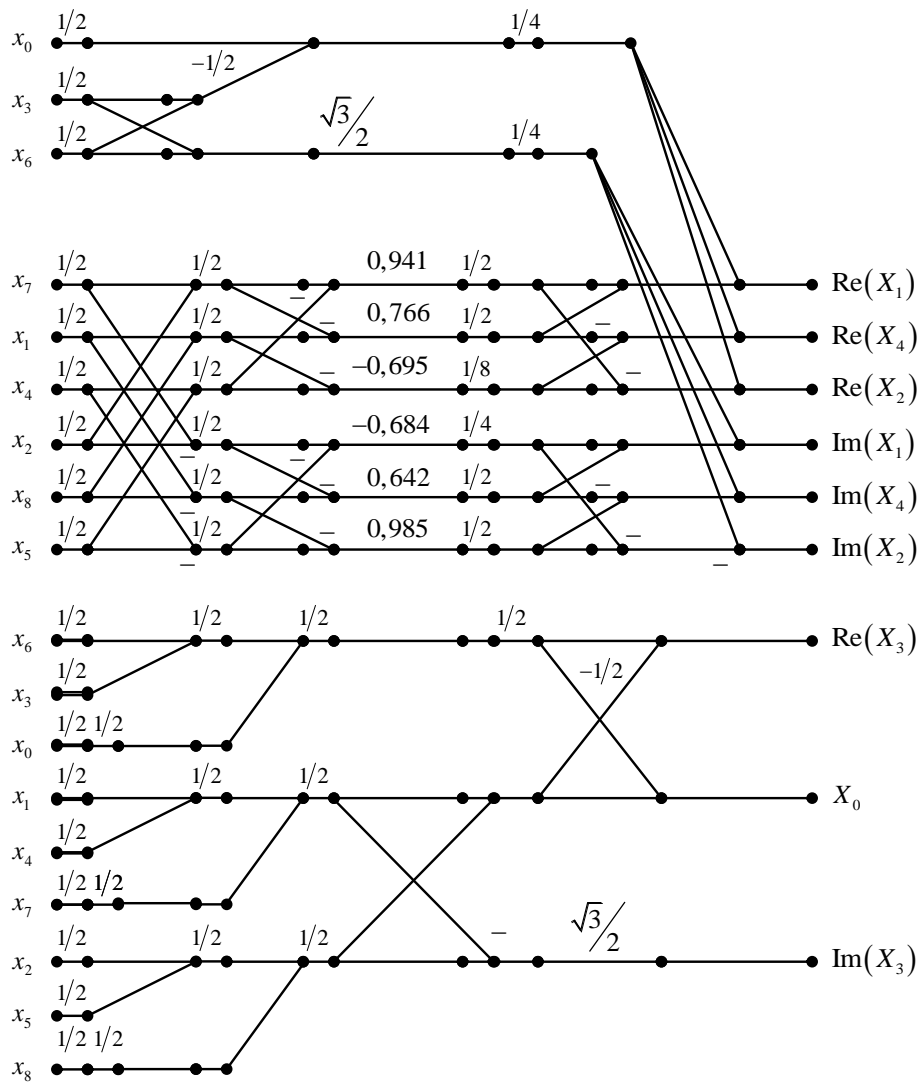


Рис. 1 – Граф алгоритму 9-точкового ШПФ для дійсної послідовності

Застосування ШПФ для побудови ефективних обчислювальних алгоритмів тактової синхронізації багатоканальних радіомодемів з вільними каналами, не обмежується каналами зв'язку телеметричних систем, і може бути розповсю-

джене на багатоканальний радіозв'язок як спеціального так і загального призначення при передаванні різноманітної інформації.

Висновок. У статті показана доцільність використання принципів ШПФ для побудови ефективних обчислювальних алгоритмів тактової синхронізації заснованих на принципі мінімуму перехідних завад у вільних каналах цифрових багатоканальних модемів, при їх використанні в захищених телеметричних системах. Розглянуті алгоритми можуть бути використані в більшості існуючих каналах радіозв'язку при передаванні різноманітної інформації.

Література

1. Скопа, А. А. Синтез помехоустойчивых модемов при совместном воздействии в канале аддитивных шумов и преднамеренных помех [Текст] / В. И. Панфилов, А. А. Скопа // Наукові записки УНДІЗ. – К. : УНДІЗ. – 2008. – №6(8). – С. 72-80.
2. Петрович, Н. Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией [Текст] : монография / Н. Т. Петрович. – М. : Сов. радио, 1965. – 253 с.
3. Окунев, Ю. Б. Теория фазоразностной модуляции [Текст] : монография / Ю. Б. Окунев. – М.: Связь, 1979. – 215 с.
4. А. с. СССР. Устройство для детектирования фазоманипулированных сигналов [Текст] / И. П. Панфилов (СССР). – №1042203 ; опубл. 1983. – Бюл. №34.
5. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации [Текст] : учебник для студ. ВУЗов / А. Г. Зюко, А. И. Фалько, И. П. Панфилов и др. ; под ред. А. Г. Зюко. – М. : Радио и связь, 1985. – 271 с.
6. Евсиков, М. Ю. Методы вычисления дискретных преобразований Фурье при распознавании многочастотных сигналов, передаваемых в цифровом виде [Текст] / М. Ю. Евсиков // Электросвязь. – М. : ООО «Инфо-Электросвязь». – 2000. – № 5. – С. 30-32.

7. Балашов, В. А. Алгоритмы оптимизации спектра группового сигнала в многоканальных модемах [Текст] / В. А. Балашов, Л. М. Ляховецкий // О. : УДАЗ. – Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 1999. – №1. – С. 37-43.

8. Разработка методов повышения скорости передачи ЦС по стволам аналоговых РРСРП [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) / УНИИРТ ; рук. Б. В. Одинцов. – №01881061343. – О., 1988. – 315 с.

9. Дидковский, Р. М. Оптимальные кодовые последовательности в задачах тактовой синхронизации систем связи с фазовой манипуляцией шумового сигнала [Текст] / Р. М. Дидковский, Ю. Г. Лега, С. М. Первунинский // К. : КПИ. – 2012. – Т. 55, № 4. – С. 11-19. – (Известия вузов).

10. Заездный, А. М. Фазоразностная модуляция [Текст] : монография / А. М. Заездный, Ю. Б. Окунев, Л. М. Рахович. – М. : Связь, 1967. – 304 с.

11. Гинзбург, В. В. Теория синхронизации демодуляторов [Текст] : монография / В. В. Гинзбург, А. А. Каяцкас. – М. : Связь, 1974. – 216 с.

12. Байкова, А. Т. Синтез эффективных алгоритмов быстрого преобразования Фурье и циклической свертки и их применение в устройствах сопряжения аналоговых и цифровых систем передачи [Текст] : Дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13 / А. Т. Байкова. – Л., 1984. – (Из фондов Рос. гос. библ.). – РГБ ОД 61:85-5/2137. – Режим доступа : <http://www.lib.ua-ru.net/diss/cont/168012.html>, условно-свободный. – 260 с.

13. Раннев, Г. Г. Измерительные информационные системы [Текст] : учебн. для студ. ВУЗов / Г. Г. Раннев. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.