

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА

Е.А. Данилина

catiacysha@yandex.ru

SPIN-код: 8551-0106

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена проблематика точного определения частоты радиосигнала. Представлен обзор наиболее известных подходов к автоматическому определению несущей: автокорреляционного, на основе быстрого преобразования Фурье, дискретного преобразования Фурье, измерения частоты по числу переходов сигнала через нулевой уровень, систем фазовой автоматической подстройки частоты. Выполнено сравнение вычислительной сложности, быстродействия и точности алгоритмов, а также рассмотрена их применимость в рамках поставленной задачи. Предложен алгоритм автоматической подстройки центральной частоты спектроанализатора, представляющий собой комбинацию модифицированных методов. Проведено моделирование и выполнен сравнительный анализ полученных результатов.

Ключевые слова

Радиосигнал, частота сигнала, цифровая обработка сигнала, алгоритмы определения частоты, анализатор спектра, преобразование Фурье, автокорреляция, фазовая подстройка частоты

Поступила в редакцию 29.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Одной из основных операций контроля радиосигналов является анализ их параметров. Результаты измерения таких характеристик сигнала, как несущая частота, форма, ширина и уровень спектра, параметры модуляции, используют для проверки соответствия параметров радиосистем заданным критериям [1]. Для получения подробной информации о принимаемых радиосигналах необходимо исследовать их поведение не только в частотной, но и во временной области, а также, при необходимости, определить вид и параметры модулирующих процессов [2].

Для удобного анализа цифрового фазомодулированного радиосигнала во временной области необходима точная подстройка рабочей частоты на несущую (центральную) частоту радиосигнала, плавно изменяющуюся во времени.

Не все анализаторы спектра оснащены средствами автоматического слежения за частотой. Например, в анализаторе спектра Agilent N9030A не предусмотрена возможность автоматической подстройки частоты в режиме I/Q-анализатора. С использованием стандартных средств эта процедура длится достаточно долго, поскольку алгоритм автоматической подстройки частоты доступен только в режиме анализа спектра. Для управления значением частоты в режиме анализа квадратурного сигнала требуется разработать алгоритм,

позволяющий выполнить подстройку в автоматическом режиме на основе временного отрезка принятого спектроанализатором сигнала путем точного определения смещения несущей частоты относительно текущей центральной частоты спектроанализатора.

Анализ имеющихся алгоритмов определения частоты. Для решения задачи определения частоты сигнала применяют следующие алгоритмы:

- автокорреляционный метод;
- преобразование Фурье;
- метод измерения частоты сигнала по его переходам через нулевой уровень;
- методы, основанные на подстройке фазы (Costas Loop и т. п.).

Рассмотрим подробнее основные особенности каждого метода.

Автокорреляционный метод. Использование оценки автокорреляционной функции (АКФ) является одним из наиболее популярных подходов к определению частоты несущей [3]. Однако наличие шума в сигнале ведет к неточному оцениванию АКФ. Кроме того, возникают серьезные погрешности в определении частоты сигнала, поскольку существенной может оказаться разница частот заданного и эталонного сигналов. Вычислительная сложность итеративной оценки АКФ представляет собой квадратичную зависимость от длины входной последовательности. Данный метод не может быть реализован ввиду большой ресурсоемкости.

Алгоритм преобразования Фурье. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и быстрое преобразование Фурье (БПФ) оперируют выборкой периодического сигнала во временной области. ДПФ требует N^2 вычислений с комплексными числами, тогда как БПФ — только $O(N \log N)$. В результате быстрое действие БПФ (в зависимости от N) может в сотни раз превосходить быстрое действие стандартного алгоритма. Однако БПФ вычисляет спектр дискретно — только в определенных равноудаленных N точках, в отличие от ДПФ, являющегося функцией непрерывного аргумента. Вычисление ДПФ для одной точки спектра имеет сложность $O(N)$ [4].

Метод измерения частоты сигнала по его переходам через нулевой уровень. Среди достоинств метода можно выделить простоту его реализации, стабильность работы и высокую точность даже в случае значительных отклонений формы сигнала от синусоидальной.

Погрешность измерения частоты рассматриваемого метода определяется длительностью зоны неопределенности момента пересечения входным сигналом нуля. Поскольку зона неопределенности составляет половину периода дискретизации на первое и последнее пересечение, погрешность измерения частоты можно описать выражением

$$\Delta f \leq \frac{f_{\text{АЦП}}}{2N}, \quad (1)$$

где $f_{\text{АЦП}}$ — частота дискретизации; N — число отсчетов.

Отсюда видно, что увеличение числа наблюдаемых периодов и повышение частоты дискретизации приводит к снижению погрешности [5]. Число наблюдаемых периодов в рамках поставленной задачи ограничено несколькими тысячами отсчетов (при частоте аналого-цифрового преобразователя порядка 1 МГц), вследствие чего погрешность составляет порядка сотен герц, что недостаточно для выполнения поставленной задачи.

Методы, основанные на подстройке фазы. Системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) довольно часто применяют в программных приемно-передающих устройствах для восстановления несущей. К сожалению, обычные ФАПЧ могут работать только в условиях незначительной отстройки частоты от истинного значения. Все системы ФАПЧ подразумевают работу с непрерывным сигналом, в то время как анализатор спектра измеряет сигнал порциями, значительно удаленными друг от друга во времени.

Рассмотренные выше алгоритмы в базовом виде не удовлетворяют заданным требованиям, поскольку основным критерием является высокая точность поиска частоты за малое число отсчетов сигнала.

Описание разработанного алгоритма. В задачах обнаружения и определения параметров зашумленных сигналов усиление эффекта подавления шумов и увеличения точности определения параметров сигнала можно достичь, используя несколько методов цифровой обработки в комплексе. Повышения точности определения частоты можно достичь при комбинировании нескольких подходов. Приближенное значение искомой частоты определяется посредством поиска максимального значения пиковых значений амплитудного спектра после вычисления БПФ сигнала. Более точное значение частоты сигнала можно найти благодаря передискретизации, т. е. вычислению значений ДПФ сигнала с малым шагом в окрестности максимального пика.

Разработанный алгоритм состоит из следующих этапов:

- 1) вычисление БПФ сигнала;
- 2) получение амплитудного спектра сигнала;
- 3) вычисление пиковых значений спектра;
- 4) поиск максимального значения среди пиков;
- 5) вычисление ДПФ сигнала на участке сигнала в окрестности максимального пика;
- 6) поиск максимального значения среди ДПФ;
- 7) определение частоты несущей.

Алгоритм реализован на языке C++, скомпилирован в отдельный подключаемый модуль и используется совместно с программным обеспечением анализатора спектра для автоматической подстройки частоты в процессе настройки и отладки оборудования. Алгоритм выполняет функцию PID-регулятора частоты в рамках автоматической системы управления метрологическим оборудованием [6].

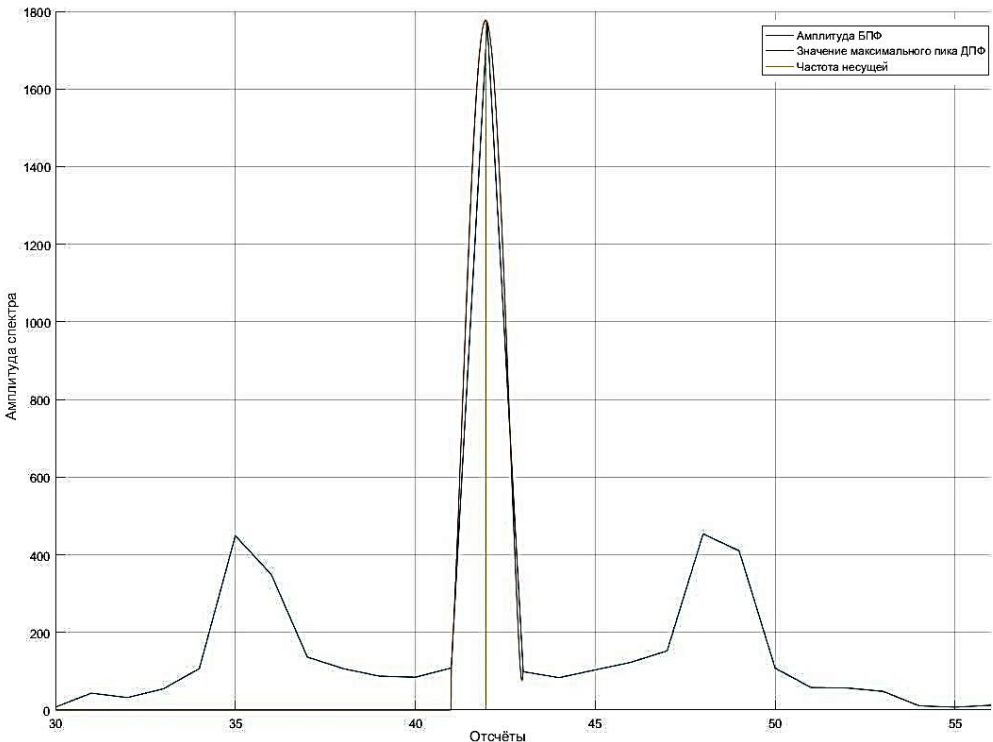
Моделирование. Для оценки качества алгоритма необходимо проверить его работу для различных типов входных данных. В качестве тестовых были вы-

браны гармонические фазоманипулированные сигналы, имеющие следующие параметры:

- частота несущей 0,1; 1,1; 2,5 МГц;
- время моделирования 0,4; 1,6; 3,3 мс;
- уровень шума 5; 10; 50 %;
- частота дискретизации 5 МГц;
- фаза $\pi/2$;
- скачок по фазе 60° ;
- скорость данных 32 кбит/с;
- число отсчетов 2 048; 8 192; 16 384.

Моделирование работы алгоритма проводилось с использованием среды MATLAB [7].

Результаты моделирования. Результаты моделирования алгоритма с 10 %-ным шумом для частоты 0,1 МГц представлены на рисунке. В графической части отражены амплитудные значения спектра сигнала после вычисления коэффициентов БПФ в сравнении с найденным значением максимального пика и значением частоты несущей. Кроме того, определено искомое значение частоты несущей и точность, с которой оно было найдено. Результаты сравнительной оценки работы алгоритма сведены в таблицу. Частота дискретизации при моделировании была принята равной 5 МГц.



Результаты моделирования для частоты 0,1 МГц

Сравнительная оценка работы алгоритма

№ п/п	Уровень шумов, %	Длительность, мс	Исходная частота, Гц	Определенная частота, Гц	Отклонение, Гц
1	0	0,4	1 100 000	1 099 989,4	10,6
2	10	0,4	1 100 000	1 099 984,6	15,3
3	5	0,4	1 100 000	1 099 987,0	12,9
4	50	0,4	1 100 000	1 099 970,3	29,6
5	10	0,4	100 000	99 992,7	7,2
6	10	0,4	2 500 000	1 999 986,1	13,8
7	10	1,6	1 100 000	1 099 997,2	2,8
8	10	3,3	1 100 000	1 099 999,8	0,155

Выводы. На основе анализа известных методов поиска частоты сигнала разработан комбинированный алгоритм точного определения частоты несущей. В результате моделирования подтверждена работоспособность алгоритма для различных наборов входных данных, что позволяет успешно применять его в прикладной системе управления.

Литература

- [1] Раушер К. *Основы спектрального анализа* / пер. с англ. Москва, Горячая линия — Телеком, 2006, 225 с.
- [2] Прокис Дж. *Цифровая связь* / пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. Москва, Радио и связь, 2000, 800 с.
- [3] Сато Ю. *Без паники! Цифровая обработка сигналов* / пер. с японск. Т.Г. Селиной. Москва, Додэка XXI, 2010, 176 с.
- [4] Лайонс Р.Г. *Цифровая обработка сигналов* / пер. с англ. под ред. А.А. Бритова. Москва, Бином-Пресс, 2006, 656 с.
- [5] Серов А.Н., Долгачева Е.А. Анализ цифрового метода измерения частоты сетевого напряжения по его переходам через ноль. *Южно-Сибирский научный вестник*, декабрь 2014, № 3 (7), с. 75–79.
- [6] Филлипс Ч.Л., Харбор Р.Д. *Системы управления с обратной связью* / пер. с англ. Б.И. Копылова. Москва, Лаборатория базовых знаний, 2001, 616 с.
- [7] Сергиенко А.Б. *Цифровая обработка сигналов*. Санкт-Петербург, Питер, 2002, 608 с.

Данилина Екатерина Андреевна — магистрант кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Жигулевцев Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

DEVELOPING AN ALGORITHM FOR AUTOMATIC TUNING OF THE SPECTRAL ANALYZER CENTRAL FREQUENCY

Е.А. Danilina

catiacatysha@yandex.ru

SPIN-код: 8551-0106

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the problem of the radio signal frequency precise determination. We present a review of the most well-known approaches to the carrier automatic determination such as: autocorrelative approach, approaches based on fast and discrete Fourier transformations, frequency-measuring according to the number of signal transitions through zero level, and phase-locked loop systems. We have compared the computational complexity, speed and precision of the algorithms and examined their applicability within the scope of the set task. The article suggests an algorithm for the spectral analyzer central frequency automatic tuning which represents a combination of the modified methods. We have conducted a simulation and made comparative analysis of the results obtained.

Keywords

Radio signal, signal frequency, digital signal processing, algorithms for frequency measuring, spectral analyzer, Fourier transformation, auto correlation, phase locked loop

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Rausher K., Yanssen F., Minikhol'd R. Osnovy spektral'nogo analiza [Fundamentals of spectral analysis. Rohde&Schwarz]. M., Goryachaya liniya—Telekom Publ., 2006. 225 p.
- [2] Proakis J., Salehi M. Digital communications. 5th ed. McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [3] Sato Yu. Bez paniki! Tsifrovaya obrabotka signalov [Don't panic! Digital processing of signals. Orig. name Illustrated introduction to mechatronics: Introduction to signal management]. M., Dodeka XXI, 2010. 176 p.
- [4] Lyons R.G. Understanding digital signal processing. Pearson Education Inc., 2004.
- [5] Serov A.N., Dolgacheva E.A. Analiz tsifrovogo metoda izmereniya chastoty setevogo napryazheniya po ego perekhodam cherez nol'. *Yuzhno-Sibirskiy nauch. vestnik* [South-Siberian Scientific Bulletin], 2014, no. 3 (7), pp. 75–79 (in Russ.).
- [6] Phillips C.L., Harbor R.D. Feedback control systems, 2d ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [7] Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2002. 608 p.

Danilina E.A. — Master's Degree student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Y.N. Zhigulevtsev, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.