

В.Н.Михайлов

Эвристические алгоритмы синтеза сигналов с малыми боковыми лепестками автокорреляционной функции

*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»*

Существуют два подхода к построению сигналов с малыми или нулевыми боковыми лепестками функции неопределенности (ФН) в рабочей области:

1. Решение задачи синтеза такого сигнала по критерию минимума боковых лепестков в заданной области:

$$V_{II}(\sigma_M) = \iint_{\sigma_M} |\chi(\tau, f_D)|^2 d\tau df_D = \min \quad (1)$$

где τ – задержка отраженного сигнала, f_D – доплеровская частота отраженного сигнала, σ_M – рабочая область радиолокатора:

$$-\tau_{\max} \leq \tau \leq \tau_{\max}; \quad -f_{D\max} \leq f_D \leq f_{D\max}. \quad (2)$$

2. Для известных сложных сигналов, методы формирования и обработки которых достаточно просты и апробированы, ввести дополнительную модуляцию, которая привела бы к улучшению свойств сигнала.

Первый подход представляет собой сложную самостоятельную задачу, не нашедшую до настоящего времени удовлетворительного решения [1].

Часто рассматривается упрощенная задача синтеза сигнала по критерию минимума боковых лепестков автокорреляционной функции (АКФ):

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s(t - \tau) dt = \min, \quad \text{при } \tau \neq 0; |\tau| < \tau_{\max}. \quad (3)$$

или минимума или равенства нулю боковых лепестков периодической АКФ.

Самыми распространенными на сегодняшний день последовательностями, удовлетворяющими таким требованиям являются коды Баркера, M-последовательности, коды на основе квадратичных вычетов, последовательности Лежандра и некоторые другие [1, 2, 3, 4]. Несмотря на то, что бинарные $\{\pm 1\}$ минимаксные последовательности выглядят достаточно привлекательно, обладая максимальным периодическим боковым лепестком $\rho_{p,\max} = 1/N$, падающим с ростом длины, достаточно вероятны ситуации, когда приемлемое значение $\rho_{p,\max}$ требует фантастически большой длины N . Привлечение не двоичной фазовой модуляции с $M > 2$ открывает путь к

многочисленным многофазным последовательностям с идеальной периодической АКФ. Известны различные правила их конструирования, однако в большей или меньшей степени все они являются производными двух наиболее распространенных алгоритмов. Первый из них, соответствующий кодам Чу (или квадратичных вычетов), вытекает непосредственным образом и аппроксимирует в дискретной форме закон линейной частотной модуляции.

Несмотря на то, что коды Чу служат достаточно убедительным академическим примером ФМ последовательностей с идеальной АКФ, их практическая реализация вызывает обоснованные сомнения, поскольку размер фазового алфавита линейно растет с увеличением длины и расстояние между соседними фазами становится чрезвычайно малым. Этим обстоятельством обусловлена возрастающая требовательность к точности формирования символов кода, качеству воспроизведения фаз, условиям эксплуатации и т.п.

Аналогичные недостатки (хотя и в несколько меньшей степени) характерны для второго популярного семейства многофазных кодов: кодов Франка. Они также осуществляют пошаговую аппроксимацию линейной частотной модуляции, однако значительно более грубую, и существуют только при значениях длин, представляющих квадрат целого числа $N = h^2 = 4, 9, 16, 25, 36, 49, \dots$ [2].

Если все бинарные последовательности с минимально возможным боковым лепестком ПАКФ вплоть до значений периода $N = 2^{10} - 1$ уже найдены путем компьютерного перебора [3], то поиск многофазных последовательностей с низким или нулевым уровнем бокового лепестка АКФ является не до конца решенной задачей.

На сегодняшний день существует два подхода к синтезу последовательностей с многоуровневой фазовой манипуляцией, не принадлежащих к кодам Чу и Франка:

1. Аналитический. На основе решения систем тригонометрических уравнений [4, 5];
2. С помощью эвристических алгоритмов, таких, например, как поиск с исключениями (Tabu search), эволюционные алгоритмы оптимизации и др. [6, 7]

В статье [6] приводится сравнение эффективности различных эвристических алгоритмов применительно к задаче синтеза полифазных кодов. Показано, что наилучшие результаты получаются при использовании гене

тических алгоритмов, а также многоуровневого поиска с исключениями в комбинации с локальным оптимизатором.

В различных источниках указывается, что использование эвристических алгоритмов не дает гарантии получения оптимального результата [6, 8]. Для улучшения сходимости эвристических, в частности генетических алгоритмов могут быть использованы различные методы. Наиболее распространенным является использование в дополнение к генетическому алгоритму локального оптимизатора. Например, в [9] локальный оптимизатор использовался для поиска стартовой последовательности генетического алгоритма. Проверка этого алгоритма на случайно выбранных длинах искомым последовательностей показала хорошие результаты.

Хорошие результаты дает оптимизация с помощью различных комбинаций генетических алгоритмов с поиском с исключениями [8, 10].

В [10] рассмотрено 3 варианта комбинаций:

Добавленный локальный поиск (Appended Local Search) в котором поиск с исключениями использует лучшие значения, полученные с помощью генетических алгоритмов.

Внедренный локальный поиск (Embedded Local Search) при котором генетический алгоритм выполнялся до достижения определенного числа популяций, после чего проводилась одна итерация поиска с исключениями. Затем опять выполнялся поиск на основе генетического алгоритма. Эта последовательность выполнялась до достижения требуемого значения оценочной функции.

Динамический локальный поиск (Dynamic Local Search). Этот метод основан на внедренном локальном поиске, но в нем используется предварительная оценка различности исходных хромосом, что бы исключить преждевременную сходимость к локальному оптимуму.

В статье отмечается, что наиболее эффективным показал себя динамический локальный поиск.

Автором доклада рассматривалась возможность использования списка исключений (Taboo list), характерного для поиска с исключениями для ограничения скорости сходимости генетического алгоритма к локальному максимуму. Задача решалась путем исключения нескольких лучших значений (локальных максимумов), полученных на предыдущем шаге из исходных данных для последующего шага на несколько итераций. Это приводило к расширению поля поиска, которое, в противном случае могло свестись к окрестностям локальных максимумов, полученных на начальных итерациях. Моделирование показало, что этот способ позволяет уменьшить время поиска и увеличить вероятность попадания в глобальный максимум целевой

функции. При синтезе бинарных последовательностей, выигрыш в скорости и вероятности нахождения локального максимума достигали 10-15 процентов от времени, показанного классическим генетическим алгоритмом.

Литература

1. Морская радиолокация. Под редакцией проф. В.И. Винокурова. Судостроение. 1986. С. – 256.
2. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. – М.: Техносфера, 2007 – 487 с.
3. Парсаев Н.В. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. «Синтез и анализ фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией», Спб., 2010.
4. Винокуров В.И., Гантмахер В.Е. Дискретно-кодированные последовательности. – Ростов на Дону: Издательство Ростовского университета, 1990 – 288 с.
5. Леухин А.Н., Парсаев Н.В. Общий подход к построению фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией. // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника.– 2009.–№6.–С.5–12.
6. Genetic algorithm for designing a spread-spectrum radar polyphase code, Ivana Ljubić, J. Kratica, V. Filipovic and D. Tovsić, In 5th Online World Conference on Soft Computing Methods in Industrial Applications, WSC5, pages 191-197, Internet, 2000.
7. Using genetic algorithms for radar waveform selection, Christopher T. Capraro, Ivan Bradaric, Gerard T. Capraro and Tsu Kong Lue, 2008 IEEE Radar Conference, pages 1250-1255.
8. Михайлов В.Н. Особенности формирования зондирующих сигналов с многоуровневой фазовой манипуляцией с помощью генетических алгоритмов // Труды 65-й научно-технической конференции посвященной дню радио.–СПб., 2010 – С.51-52.
9. A hybrid optimization method for designing polyphase sequences, A.Milewski, D.Szczegielniak. citeseerx.ist.psu.edu.
10. restricted evaluation genetic algorithms with tabu search for optimising boolean functions as multi-level AND-EXOR networks, Julian. F. Miller and Peter Thomson. Evolutionary Computing Lecture Notes in Computer Science, 1996, Volume 1143/1996, P. –85-101.