

02, февраль 2016

УДК 621.396.621

Применение метода Прони в пассивном радиолокаторе

Полюшкин И.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана,
кафедра «Автономные информационные и управляющие системы»*

Научный руководитель: Силин С.И., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана
кафедра «Автономные информационные и управляющие системы»*

kafsm5@sm.bmstu.ru

1. Введение

В данном докладе рассматривается система пассивной радиолокации, предназначенная для, измерения пеленга на источник излучения, определения радиотехнических параметров сигнала, формирования формуляров специнформации, приема внешних управляющих команд и формирования команд управления другими блоками и устройствами системы.

Описан алгоритм работы метода сверхразрешения Прони применительно к текущей задаче. Описано разработанное программное обеспечение для ПЛИС, реализующее один из шагов работы алгоритма метода Прони (расчет КМ).

2. Состав бортовой системы

Бортовая система (рис. 1) состоит из антенной системы (АС), высокочастотной части (ВЧ), блока цифровой обработки сигнала (БЦОС) и автоматического рабочего места (АРМ).

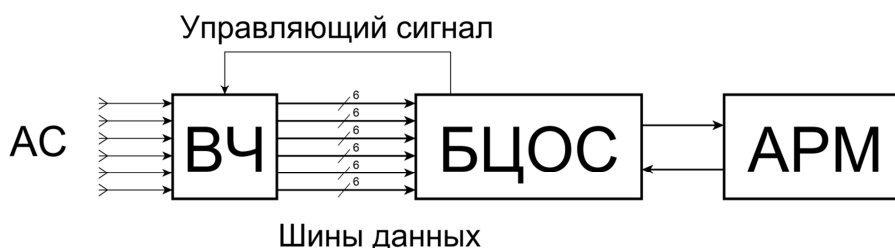


Рис. 1. Структурная схема системы

Радиосигнал, создаваемый радиолокационными станциями, попадает на шесть антенн антенной системы, находящихся на борту летательного аппарата. На антеннах происходит преобразование падающей электромагнитной волны в соответствующее осциллирующее высокочастотное напряжение с частотой f_0 .

В блоке высокочастотных преобразований (ВЧ) спектр полученных на АС сигналов переносится в область низких частот. И оцифрованные сигналы на частоте $f_{пч}$ (промежуточная частота) поступают в блок цифровой обработки сигнала.



Рис. 2. Структурная схема БЦОС

На рис. 2 представлена структурная схема БЦОС. Сигнал, проходя фильтр, попадает на усилитель-ограничитель, где он ограничивается по уровню, затем он снова фильтруется. Полученный сигнал заводится на модуль АЦП, результат преобразования передается в модуль первичной обработки.

В модуле первичной обработки происходит определение вида модуляции сигнала и его параметры, определяется мощность принимаемого сигнала, пеленг, ширина спектра, средняя частота спектра.

Одновременно производится обработка сигналов шести шестиканальных приемно-пеленгационных устройств.

С выходов АЦП каждого пеленгатора оцифрованные сигналы шести каналов по шестнадцатиразрядным шинам передаются в ПЛИС, и последующая обработка производится там.

На рис. 3 показана структурная схема алгоритма работы блока первичной обработки.

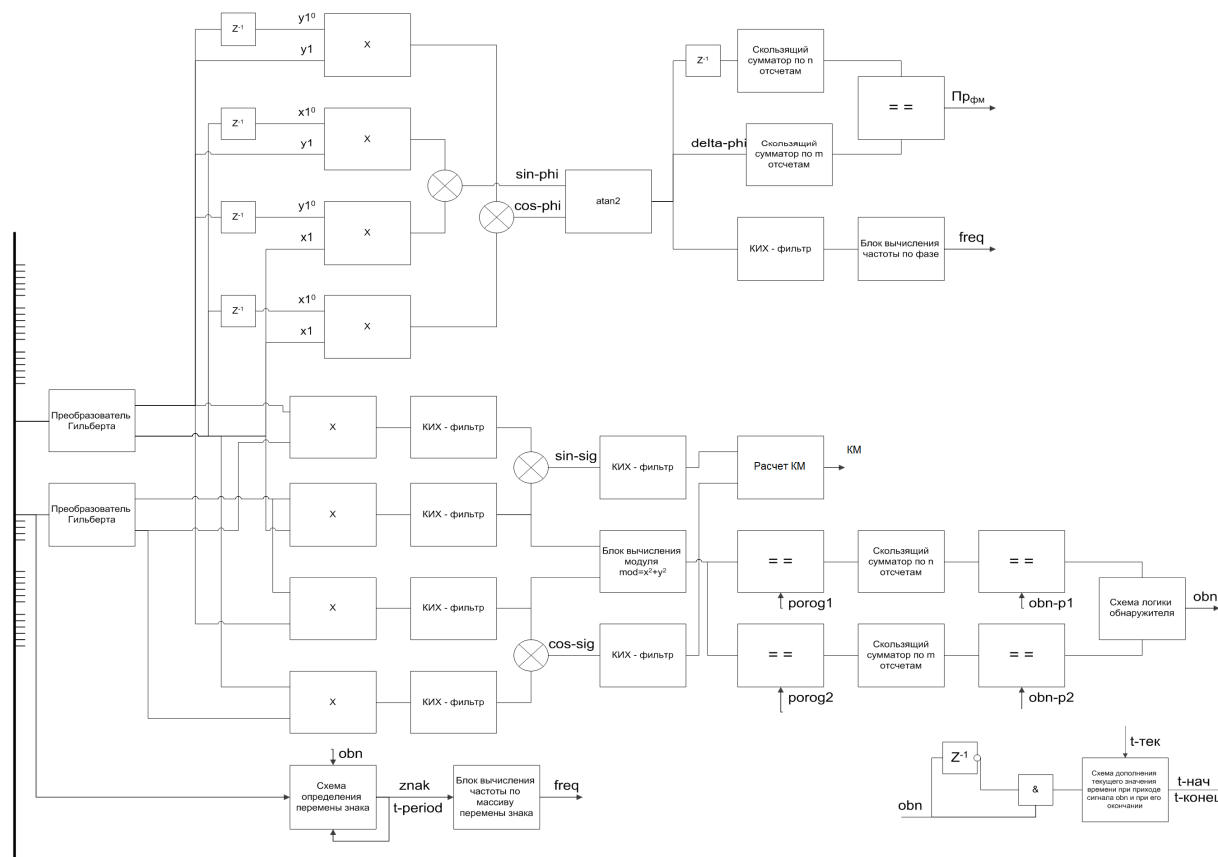


Рис. 3. Структурная схема алгоритма работы блока первичной обработки

В данном блоке происходит расчет оценки корреляционной матрицы, которая необходима для дальнейшей работы метода Прони, алгоритм работы которого представлен ниже.

3. Метод Прони

В рамках данной задачи метод Прони применяется для оценки пространственных частот, на основании которых, а также априорного знания пространственной конфигурации антенной решетки, мы можем судить об углах прихода сигналов.

Метод Прони аппроксимирует последовательность комплексных данных x_i моделью, состоящей из p затухающих комплексных экспонент $\hat{x}_i$:

$$\hat{x}_n = \sum_{k=1}^p \left[A_k \exp(j2\pi f_k T + j\Theta_k) \exp(\alpha_k T) \right],$$

где A_k – амплитуда, f_k – частота, Θ_k – начальная фаза, α_k – коэффициент затухания и T – период дискретизации сигнала.

Данный метод, строго говоря, не является методом спектрального оценивания. Тем не менее, он тесно связан с алгоритмами линейного предсказания по методу наименьших квадратов, используемыми при спектральном оценивании на основе моделей авторегрессии. В отличие от стохастических параметрических АРСС – моделей, в методе Прони для аппроксимации данных используется детерминированная экспоненциальная модель, вычисление спектральной плотности энергии (СПЭ) которой и составляет суть спектральной интерпретации метода Прони.

Заметим, что периодограммную оценку спектральной плотности мощности (СПМ) можно считать эквивалентной среднеквадратичной аппроксимации данных с помощью ряда Фурье, т.е. гармонического набора комплексных синусоид. Так для N отсчетов данных $x[0], \dots, x[N-1]$, разделенных интервалом T , аппроксимирующая последовательность $\hat{x}[n]$ имеет вид

$$\hat{x}[n] = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \exp(j2\pi f_m nT), \quad n = \overline{0, N-1},$$

где

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi f_m nT), \quad m = \overline{0, N-1},$$

если коэффициенты a_m определяются из условия минимизации суммарной среднеквадратичной ошибки аппроксимации $\sum_{n=0}^{N-1} |x[n] - \hat{x}[n]|^2$, а частоты f_m гармонически связаны между собой:

$$f_m = \frac{m}{nT}, \quad m = \overline{0, N-1}.$$

Таким образом, в гармонической модели частоты и число синусоид задаются заранее, поэтому необходимо оценивать только мощность этих синусоидальных составляющих на основе соотношения:

$$|a_m|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi mn/N) \right|^2, \quad m = \overline{0, N-1},$$

соответствующего вычислению СПМ дискретной периодограммы.

При наличии N комплексных отсчетов данных $x[n]$, $n = \overline{1, N}$ метод Прони позволяет оценить $x[n]$ с помощью набора из p экспоненциальных функций с

произвольными амплитудами A_k , частотами f_k , фазами Θ_k и коэффициентами затухания α_k :

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^p A_k \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k)(n-1)T + j\Theta_k] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1}, \quad (1)$$

где

$$h_k = A_k \exp(j\Theta_k),$$

$$z_k = \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k)T],$$

h_k – это комплексная амплитуда, представляющая собой независимый от времени параметр, а z_k – это комплексная экспонента, которая описывает параметр, зависящий от времени.

В результате математических операций, получаем:

$$x[n] = -\sum_{m=1}^p a[m] \hat{x}[n-m] + \varepsilon[n] = -\sum_{m=1}^p a[m] x[n-m] + \sum_{m=0}^p a[m] \varepsilon[n-m], \quad (2)$$

где использовано равенство $\hat{x}[n-m] = x[n-m] - \varepsilon[n-m]$ и положено $a[0] = 1$.

Соотношение (2) можно трактовать как моделирующее процесс с помощью модели авторегрессии и скользящего среднего (АРСС-модели) с идентичными АР- и СС-параметрами, возбуждаемой шумовым процессом $\varepsilon[n]$. Таким образом, первый этап обобщенной процедуры Прони сводится к процедуре оценивания АР-параметров $a[m]$ на основе ковариационного метода линейного предсказания с оценкой числа экспонент p по правилам выбора порядка АР-модели. Методы оценивания авторегрессионных параметров подробно описаны в [3], [4].

Второй этап процедуры состоит в нахождении корней z_i полинома (3) сформированного из коэффициентов линейного предсказания $a[m]$ (факторизация полинома).

$$\Phi(z) = \sum_{m=0}^p a[m] z^{p-m}. \quad (3)$$

Наконец, когда значения параметров $z_1 \dots z_p$ были определены с помощью линейного предсказания по методу наименьших квадратов и факторизацией полинома, то аппроксимация $\hat{x}[m]$, становится линейной относительно оставшихся неизвестных параметров $h_1 \dots h_p$. Матричная форма соотношения (1) имеет вид

$$\hat{X} = Z \cdot H,$$

где $(N \times p)$ матрица Z , $(p \times 1)$ вектор H и $(N \times 1)$ вектор $\hat{X}$ определяются выражениями:

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_1 & \dots & z_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_1^{N-1} & \dots & z_1^{N-1} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix}, \quad \hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}[1] \\ \hat{x}[2] \\ \vdots \\ \hat{x}[p] \end{bmatrix}.$$

Минимизируя сумму квадратов ошибок $\sum_{n=1}^N |x[n] - \hat{x}[n]|^2$ по каждому параметру h_k ,

получаем следующее комплексное нормальное уравнение для их определения

$$(Z^H Z) H = Z^H X,$$

где $(p \times p)$ матрица $(Z^H Z)$ и $(N \times 1)$ вектор отсчетов данных определяются выражениями

$$Z^H Z = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{p1} & \dots & \gamma_{pp} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x[1] \\ \vdots \\ x[N] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\gamma_{jk} = \sum_{n=0}^{N-1} (z_j^* z_k)^n = \gamma_{kj}^*, \quad \gamma_{jk} = \begin{cases} \frac{(z_j^* z_k)^N - 1}{z_j^* z_k - 1}, & z_j^* z_k \neq 1 \\ N, & z_j^* z_k = 1 \end{cases}.$$

Система уравнений (4) решается относительно неизвестных параметров h_k .

По найденным параметрам z_i и h_i находятся коэффициенты затухания α_i , частоты f_i , амплитуды A_i и начальные фазы Θ_i с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \ln |z_i|, \\ f_i &= \frac{\arctg \left[\frac{\text{Im}\{z_i\}}{\text{Re}\{z_i\}} \right]}{2\pi T}, \\ A_i &= |h_i|, \\ \Theta_i &= \arctg \left[\frac{\text{Im}\{h_i\}}{\text{Re}\{h_i\}} \right]. \end{aligned}$$

Более подробно алгоритм работы метода Прони описан в [1, 7], обобщение этого метода на рассматриваемый случай описано в [2] и реализовано программой SYMCOVAR.

4. Алгоритм расчета корреляционной матрицы средствами ПЛИС

Работа метода Прони включает в себя оценку корреляционной матрицы, в данной статье будет описан только алгоритм работы модуля оценки КМ, который показан на рис.3.

Работа данного метода оперирует сигналами в цифровом представлении, особенности обработки цифровых сигналов рассмотрены в [5, 8], специфика работы на базе ПЛИС показана в [6].

На вход данному модулю подводятся следующие сигналы:

- общий тактовый сигнал (не показан на структурной схеме);
- общий сигнал сброса (не показан на структурной схеме);
- входные данные;

На выходе имеем сигналы:

- сигнал готовности отправки данных (не показан на схеме);
- выходные данные;
- сопровождающий данные строб (не показан на схеме).

Полученная в блоке первичной обработки оценка КМ передается в блок вторичной обработки, где происходит последующая обработка сигнала и работа самого алгоритма Прони.

Алгоритм оценки КМ работает по принципу детерминированного конечного автомата, структурная схема которого представлена на рис. 4.

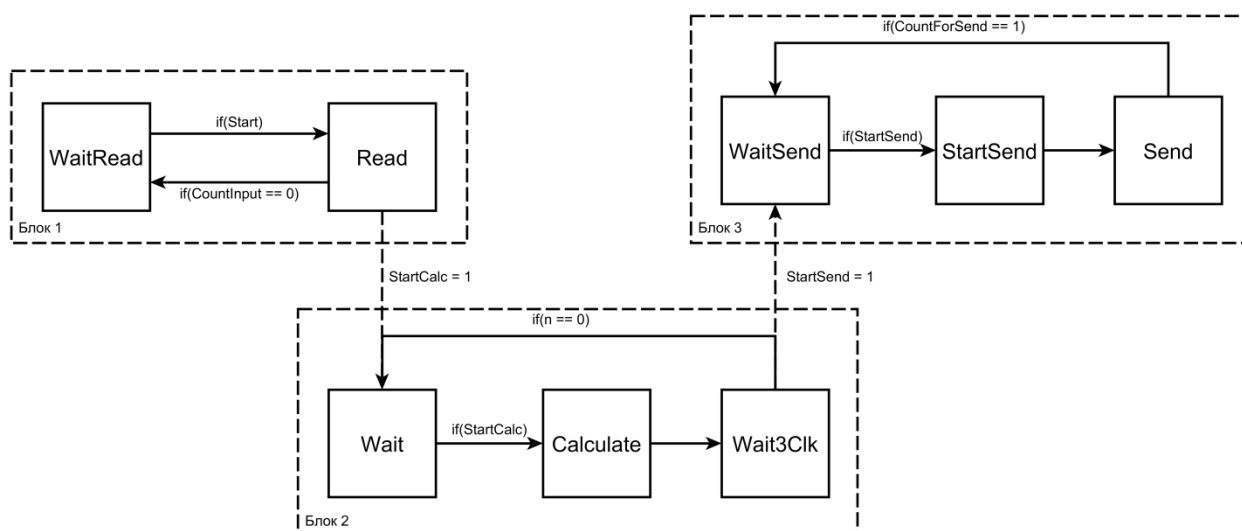


Рис. 4. Структура конечного автомата алгоритма расчета КМ

Блок 1- блок приема данных и записи их в RAM память. По сигналу iStart автомат переходит в состояние чтения и считывает фиксированное количество входных данных,

после чего выставляет сигнал StartCalk равным единице и снова переходит в режим ожидания.

Блок 2- по сигналу StartCalk, подаваемому с предыдущего конечного автомата, данный блок переходит в режим вычисления и осуществляет перемножение входных. Умножение выполняется в стандартном сгенерированном модуле конвейерным способом, что является наиболее удобным и эффективным при большом количестве операций, но приводит к появлению задержки между подачей данных на обработку и получением результата. После того как все данные для получения первого отсчета спектра были “загружены в конвейер” активируется третий блок, о котором будет сказано ниже. После того, как все данные были загружены в конвейер, автомат переходит в состояние Wait3clk, в котором в течение трех тактов принимаются данные с модуля умножения, не принятые в предыдущем состоянии из-за задержки умножителя. По истечении трех тактов конечный автомат переходит в режим ожидания.

Блок 3 передает данные из RAM памяти в модуль отправки данных.

Заключение

Таким образом, нами было рассмотрено назначение модуля блока цифровой обработки сигналов, модуля определения углов прихода сигналов. Был рассмотрен алгоритм работы метода Прони, а также описана реализация одного шага метода Прони (оценка КМ) в ПЛИС.

Список литературы

- [1]. Кривошеев В.И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ). Н-Новгород.: ННГУ, 2006. 117 с.
- [2]. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- [3]. Хохлов В.К. Обнаружение, распознавание и пеленгование объектов в ближней локации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 336 с.
- [4]. Мусьяков М.П., Хохлов В.К. Регрессионные системы обнаружения и распознавания случайных сигналов в ближней локации. М.: ЦНИИИТИ, 1988. 171 с.
- [5]. Сергиенко А.Б., Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 756 с.
- [6]. Глазков В.В., Программируемые логические интегральные схемы фирмы Altera. М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2014. 133 с.

- [7]. Логвиненко А.С., Жураковский В.Н. Повышение точности измерения параметров сигналов в цифровом тракте // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электронный журнал. 2014. № 10. Режим доступа:
<http://engbul.bmstu.ru/doc/740571.html> (дата обращения 18.05.2015).
- [8]. Кондрашов К.С., Жураковский В.Н., Силин С.И. Принципы проектирования встраиваемых систем на основе программных средств // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электронный журнал. 2014. № 11. Режим доступа:
<http://engbul.bmstu.ru/doc/738746.html> (дата обращения 18.05.2015).