

ступления новой информации по заявке. Т.о., после приема заявки спутник рассчитывает, когда он может произвести съемку по данной заявке, и заполняет соответствующий элемент в своей очереди заявок. После этого элемент очереди заявок рассылается всем видимым спутникам. Те, в свою очередь, анализируют полученную информацию, рассчитывают свои времена съемки, пополняют свою матрицу ответов информацией о соседях и отсылают элемент своей очереди заявок в эфир. Для того чтобы исключить циркуляцию уже отработанных заявок, в системе используется следующий принцип. Спутник, принявший некоторый пакет, рассылает его всем, кто находится в зоне видимости, только тогда, когда в пакете имеется новая для него информация (новая заявка, новые сведения о временах съемки от других спутников и т.д.). Если информация нова для этого спутника, то можно предположить, что она заинтересует и другие спутники. Через некоторое время все спутники системы будут иметь полную информацию о возможности съемки и о времени съемки. И на каждом спутнике должна будет решена простая оптимизационная задача: из указанных времен выбирается наименьшее.

Принципы организации межспутниковой связи описываются следующим образом. Все спутники в системе равноправны, т.е. любой спутник может начать передачу в любой момент времени (если передающая среда свободна). Данные, передаваемые одним спутником, доступны всем спутникам, находящимся в зоне видимости этого спутника. Для организации взаимодействия спутников в системе используется метод Множественного доступа с контролем несущей и обнаружением столкновений (коллизий).

Для моделирования данной системы разработан испытательный стенд. Аппаратная часть: несколько (3-4) P75-100 \ 8-16 Мб о.с. Windows 95(NT), объединенных ЛВС. На ЭВМ установлено программное обеспечение, моделирующее движение спутников и межспутниковые связи, а также реализующее алгоритм планирования и съемки.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПРОНИ И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОЙ МОДЕЛИ

Автор: Баев А.Б., студент группы Р-402

Научный руководитель: Кузнецов Ю.В., к.т.н., доцент каф. 405

К настоящему времени разработано огромное количество методов оценивания параметров резонансных моделей. Однако из-за сложности

задачи и ее математической некорректности до сих пор не найден алгоритм, применимый и обладающий преимуществом во всех практических случаях. Выбор алгоритма обработки сигналов часто осуществляется методом проб и ошибок и во многом зависит от особенностей сигнала и целей экспериментального исследования.

Наибольшее распространение получил разработанный еще в 18 веке метод Прони, осуществляющий аппроксимацию данных с использованием детерминированной экспоненциальной модели. В настоящее время широко используется модификация метода Прони, основанные на критерии среднеквадратической ошибки (алгоритмы линейного предсказания вперед и назад), а также линейная процедура наименьших квадратов, называемая обобщенным методом Прони.

Особого внимания заслуживает совместное использование алгоритмов ЛП вперед и назад и сочетание линейного метода Прони с нелинейной операцией усечения матрицы данных с использованием сингулярного разложения.

Для сравнения различных модификаций метода Прони нами использовалась модель, представленная в следующем виде:

$$y_k = x_k + n_k = \sum_{t=1}^M |b_t| \exp[(\alpha_t + j\omega_t)k + j\phi_t] + n_k, \quad (1)$$

где  $k = 0, 1, \dots, N-1$  – номера отсчетов сигнала  $y_k$ ;  $N$  – число отсчетов данных;  $M$  – порядок модели;  $n_k$  – отсчеты шума;  $|b_t|$ ,  $\phi_t$ ,  $\alpha_t$  и  $\omega_t$  – значения амплитуд, фаз, коэффициентов затухания и частот соответственно.

Ясно, что полюса  $z_t$  и вычеты  $b_t$  сигнала

$$z_t = \exp(\alpha_t + j\omega_t), \quad b_t = |b_t| \exp(j\phi_t) \quad (2)$$

существуют комплексно-сопряженными парами, поскольку значения отсчетов – действительные числа.

Суть метода Прони состоит в подгонке экспоненциальной модели к измеренным через равные промежутки времени значениям. Метод осуществляется в три этапа. На первом этапе определяются параметры предсказания вперед  $a^f$  и назад  $a^b$  путем решения системы линейных уравнений:

$$\mathbf{R} \begin{bmatrix} 1 \\ a^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho^f \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} \begin{bmatrix} a^b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho^b \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}$  – корреляционная эрмитова матрица размера  $(M+1) \times (M+1)$ , составленная из отсчетов сигнала (1),  $\rho^f$  и  $\rho^b$  – квадраты средних ошибок линейного предсказания вперед и назад. На втором этапе из векторов  $a^f$  и  $a^b$  формируются полиномы

$$\Psi^f(z) = \sum_{m=0}^M a^f [m] z^{M-m}, \quad \Psi^b(z) = \sum_{m=0}^M a^b [m] z^{M-m}, \quad (4)$$

где индекс “\*” означает комплексное сопряжение, и определяются их корни  $z$ , дающие оценки коэффициентов затухания и частот для каждого полюса (2). На третьем этапе определяются амплитуды и фазы компонент сигнала.

Для того чтобы сравнивать эффективность модификаций метода Прони, мы использовали сигнал (1), состоящий из трех затухающих косинусоид с динамическим диапазоном амплитуд  $\approx 10$ . Частоты компонент сигнала лежали в диапазоне от 6 до 100 МГц, а коэффициенты затухания выбирались из условия обеспечения добротностей полюсов порядка 1,5 – 2. Начальные фазы косинусоид – случайные. Такая модель соответствует собственным резонансным излучениям некоторых физических объектов. В модель добавлялся “нормальный” шум, ограниченный полосой 150 МГц. Отношение сигнал/шум оценивалось по формуле

$$G = 10 \log \left( \frac{A^2}{D} \right), \quad (5)$$

где  $D$  – дисперсия шума;  $A^2$  – максимум автокорреляционной функции сигнала.

В результате проведения статистических экспериментов мы убедились, что при малом уровне шума выбор невысоких порядков модели  $M$  обеспечивает получение удовлетворительных результатов. Однако при высоких уровнях шума оценки частот и коэффициентов затухания оказывались неточными и смещенными из-за воздействия шума.

Разделить корни характеристических полиномов Прони (4) на корни, соответствующие полюсам сигнала, и корни, соответствующие шуму; было весьма затруднительно. Для улучшения точности оценок коэффициентов затухания и частот сигнала мы использовали три подхода: использовали нули полинома линейного предсказания вперед и назад совместно, использовали большие порядки модели и применяли разложение по сингулярным числам.

При выполнении большого числа статистически независимых опытов полюса, соответствующие сигналу, группировались ближе к своим действительным положениям, а полюса шума размещались произвольно внутри окружности единичного радиуса. При увеличении уровня шума группировка полюсов сигнала становилась менее выраженной. Повысив порядок модели  $M$  до значения, близкого к  $N/2$ , нам удалось уменьшить дисперсию полюсов, но различить полюса сигнала на фоне всех найденных полюсов отдельно для метода ЛП вперед и назад было довольно сложно. При совместном анализе двух методов было замечено, что полюса сигнала появляются во взаимно обратных точках, расположенных

вдоль некоторого общего радиуса. Проводя такие радиусы, удавалось отделить полюса сигнала от полюсов шума уже по результатам нескольких опытов.

При проведении экспериментов с использованием сингулярных методов Прони вперед и назад было замечено, что полюса шума имеют значительно меньший разброс и образуют регулярно расположенные группы внутри единичной окружности, что характерно для аппроксимации белого шума с помощью экспоненциальной модели. В то же время полюса сигнала имели явно нерегулярное расположение.

Для того чтобы провести сравнение различных модификаций метода Прони, мы оценивали дисперсию частоты полюсов, полученную в результате 200 статистически независимых опытов

$$\sigma_{\omega}^2 = \sum_{n=1}^N (\omega_{in} - \omega_p)^2 / N, \quad (6)$$

где  $\omega_p$  – истинное значение частоты полюса;  $\omega_{in}$  – значение частоты  $i$ -го полюса, полученное в результате  $n$ -го опыта;  $N = 200$  – число опытов. Дисперсия коэффициентов затухания оценивалась аналогичным образом.

Из результатов проведенных исследований следует, что при большом отношении сигнал/шум ( $G \geq 25$  дБ) рассмотренные модификации метода Прони обеспечивают требуемую точность оценки параметров резонансной модели. При выбранных моделях полезного сигнала и шума наиболее перспективной модификацией метода Прони, обеспечивающей наивысшую точность оценки параметров при одинаковых аппаратно-временных затратах, является сингулярный метод Прони назад. Этот метод практически не уступает непараметрическому методу расщепления функции. Вместе с тем за рамками исследований остались частотные и другие модификации метода Прони.

#### Литература

- D.M. Goodman, D.G. Dudley. An Output Error Model and Algorithm for Electromagnetic System Identification // Circuits Systems Signal process. Vol. 6. № 4. 1987.
- С.Л. Марпл мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. - М.: Мир, 1990.

## КРИПТОЗАМОК

Автор: **Рошин А.Б.**, студент группы 04-316  
 Научный руководитель: **Назаров О.П.**, к.т.н. доцент каф. 403

Проблема опознавания пользователя в системе в настоящее время приобрела большую актуальность. При этом понятие “система” может