

2. Инвариантный метод анализа телекоммуникационных систем передачи информации : монография / В. Б. Малинкин, Е. И. Алгазин, Д. Н. Левин, В. Н. Попантопуло. Красноярск, 2006.

3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд. М. : Радио и связь, 1989.

4. Теплов Н. Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации. М. : Связь, 1964.

E. V. Malinkin

## INVARIANT TRANSMISSION OF SIGNALS WITH PROCESSING IN FREQUENT FIELD

*The work offers a method of transmission of signals with the subsequent processing in the frequency field. In order to realize such kind of processing, the structure based on direct and inverse Fourier transformation with division element that makes it possible to realize the quotient of the current and subsequent processing block is offered.*

*Keywords: noise immunity, invariant, invariant relative amplitude modulation, probability of pairwise transition, signal/noise relation.*

© Малинкин Е. В., 2010

УДК 629.7.05

О. В. Зайцев

## МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ

*Рассмотрены вопросы восстановления уровня несущей частоты телеметрического сигнала при цифровой обработке в тракте автоподстройки частоты и вычисления порога для принятия решения об истинности принятого символа информации, поступающей с космических аппаратов и ракетоносителей. Описаны методика и алгоритм вычисления уровня несущей частоты и значения порога для принятия решения на основе гистограммной обработки сигнала с выхода частотного детектора.*

*Ключевые слова: система управления, обработка сигналов, телеметрия.*

Контроль правильности отработки полетного задания бортовыми системами ракетоносителей (РН) и космических аппаратов (КА) осуществляется на основе обработки телеметрической информации (ТМИ) о состоянии большинства агрегатов и элементов объекта [1]. Для оптимального приема и обработки ТМИ, поступающей на наземные средства приема, необходимо восстановить несущую частоту радиосигнала и вычислить порог принятия решения для достоверного определения принимаемого символа информации (нуля или единицы).

В настоящее время в цифровых трактах приемных устройств для восстановления несущей радиосигнала с частотной манипуляцией чаще всего используются традиционные методы: быстрое преобразование Фурье (БПФ) или линейная фильтрация информационного параметра [2]. Применение БПФ требует большого количества производимых операций для получения необходимого результата и, следовательно, значительного времени для проведения анализа сигнала. А при линейной фильтрации весьма сложно получить несмещенную оценку обрабатываемого параметра. Кроме того, традиционные методы при обработке сигнала на фоне сильных шумов не позволяют достоверно определять несущую радиосигнала [3], что значительно сни-

жает чувствительность цифровых радиоприемных трактов.

Методики и алгоритмы восстановления уровня несущей сигнала, альтернативные БПФ и методу линейной фильтрации, в настоящее время по-прежнему остаются слабо освещенными в отечественной и зарубежной литературе [4–6]. Поэтому разработка методики и алгоритма восстановления несущей радиосигнала на основе гистограммного метода, требующего проведения значительно меньших по сравнению с БПФ вычислительных затрат, является весьма актуальной.

Суть этого метода заключается в следующем. Диапазон возможных уровней сигнала на выходе частотного детектора разбивается на оптимальное число контрольных уровней, или интервалов. Сигнал после частотного детектора подается на блок построения гистограммы уровней. В этом блоке значения амплитуды сигнала сравниваются со значениями контрольных уровней, при этом фиксируется число попаданий значений амплитуды сигнала в интервал  $\Delta_k = \frac{A_k - A_{k-1}}{2}$ , где  $A_k$  и  $A_{k-1}$  – значения соседних контрольных уровней. Затем формируется одномерный вектор, т. е. вектор числа попаданий уровня сигнала в интервал « $\Delta(k)$  – гистограмма  $H(k)$ ». Параллель-

но формируется вектор аккумуляторов  $S(k)$  или вектор суммы уровней сигнала в интервале  $\Delta(k)$ . По значениям гистограммы уровней сигнала определяются максимумы верхнего и нижнего уровней сигнала. На следующем шаге по значению максимумов  $H(k)$  и накопленному (аккумулятивному) значению сигналов  $S(k)$  в максимумах вычисляется среднее значение верхнего (или нижнего) значения уровня сигнала.

Рассмотрим сигнал на выходе частотного детектора  $A(t)$  типичного двоичного приемника и соответствующую ему гистограмму (см. рисунок). Верхнему  $A_1$  и нижнему  $A_0$  уровням сигнала на гистограмме  $H(k)$  соответствуют два максимума. Значения максимумов зависят от количества единичных и нулевых символов в информационной посылке на интервале оценки. При равенстве количества единиц и нулей высота максимумов одинакова. При увеличении уровня шумов максимумы гистограммы сливаются в один, который соответствует распределению среднего уровня сигнала и шумов. Расстояние между максимумами определяется размахом сигнала. Середина расстояния  $(A_1 + A_0)/2$  является уровнем несущей, зависящим только от расстройки частоты, и будет оптимальным порогом для решающего устройства, квантующего аналоговый сигнал частотного детектора на два уровня: единицу и нуль. Сигнал  $D(t)$  на выходе схемы принятия решения является бинарным образом сигнала  $A(t)$ .

Количество единиц и нулей в информационной посылке в течение какого-либо периода может сильно различаться. Количественный максимум единиц (нулей), как показано на гистограмме справа, будет определять среднее текущее значение уровня сигнала единицы (нуля). Расстояние между уровнями сигнала гистограммных максимумов делится пополам и принимается за среднее значение уровня восстановленной несущей [6; 7].

Таким образом, методика восстановления уровня несущей гистограммным методом включает следующие этапы:

1) определение интервала, на котором производится оценка уровней сигналов единиц и нулей. Установлено, что наилучший результат получается на интервале, совпадающем по длительности с интервалом накопления

значений сигнала для схемы автоподстройки частоты. Это связано с тем, что уровень сигнала на данном интервале минимально подвержен изменению;

2) подсчет числа попаданий сигнала в контрольные интервалы и аккумулятирование уровней текущего сигнала для каждого столбца гистограммы на интервале обработки;

3) определение максимумов гистограммы и вычисление среднего текущего значения уровня несущей;

4) восстановление принятого сигнала.

Основные характеристики данной методики следующие:

- обеспечение линейной зависимости оценки уровня несущей от расстройки;
- обеспечение несмещенной оценки среднего уровня несущей (ее значение не зависит от количества единиц и нулей в информационном сообщении);
- высокая устойчивость алгоритма восстановления уровня несущей, разработанного на основе этой методики, при высоком уровне шумов.

На основе предложенной методики построен следующий алгоритм.

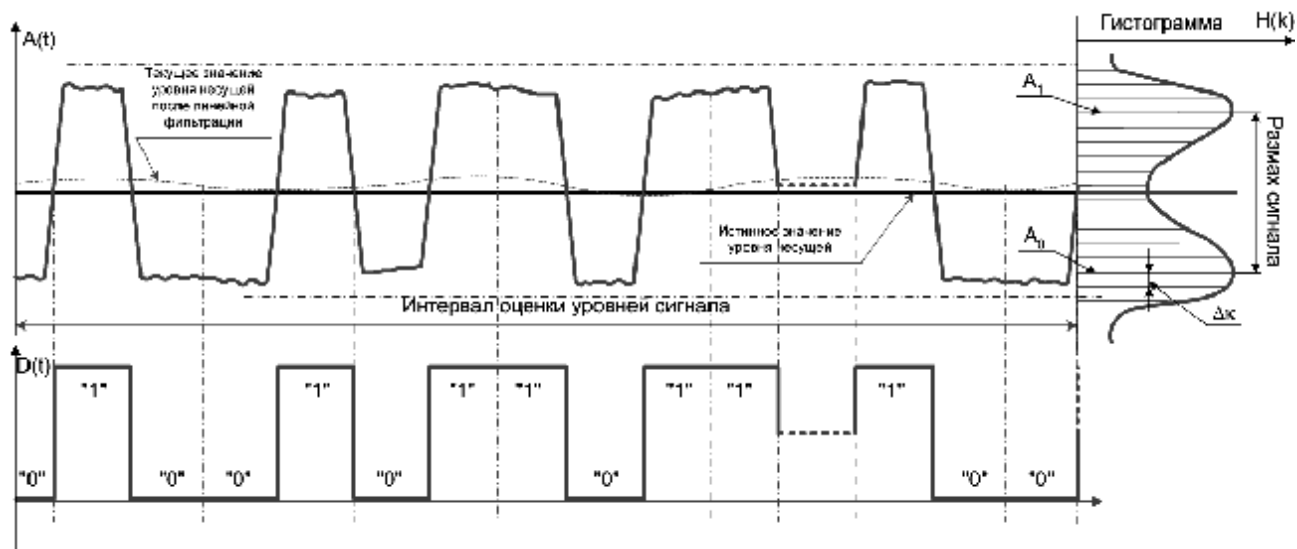
На временном интервале, равном времени  $\tau_{\text{АПЧ}}$ , строится гистограмма  $H(k)$  выходных отсчетов частотного детектора. Количество диапазонов, или столбцов гистограммы  $k$  определяется необходимой точностью вычислений и однозначностью нахождения максимумов, соответствующих уровням передаваемых символов.

Параллельно вычисляются суммы  $S(k)$  по  $k$  диапазонам гистограммы. Далее производятся следующие операции:

1) нахождение максимумов величин  $\max_0 = H_{(k=\max_0)}$  и  $\max_1 = H_{(k=\max_1)}$ , соответствующих уровням нуля и единицы;

2) оценка среднего уровня:  $\hat{A}_0 = S_{(\max_0)} / n_{(\max_0)}$  и  $\hat{A}_1 = S_{(\max_1)} / n_{(\max_1)}$ , где  $n_{(\max_0)}$  и  $n_{(\max_1)}$  – количество отсчетов соответствующих уровней, и оценка среднего уровня несущей частоты, которая поступает на экстраполятор:  $\hat{A}_H = (\hat{A}_0 + \hat{A}_1)/2$ .

Введем обозначения:  $\hat{A}_H = Y(k)$  – оценка уровня несущей в  $k$ -й момент времени;  $\hat{A}_H = Y(k+1|k)$  – выходное



Сигнал на выходе частотного детектора и его гистограмма и восстановленный сигнал на выходе схемы принятия решения

значение экстраполятора, которое является оптимальным порогом для схемы принятия решения (эта схема квантует отсчеты частотного детектора на нулевые и единичные символы).

В общем случае экстраполятор описывается уравнением типа

$$Y(k+1|k) = F[Y(k), Y(k-1), \dots, Y(k-(r-1))],$$

где  $F$  – некоторая функция от  $r$  неизвестных;  $r$  – глубина памяти экстраполятора.

В устройстве слежения используются два экстраполятора: линейный по двум точкам ( $r=2$ ) и квадратичный по шести точкам ( $r=5$ ):

$$\begin{aligned} Y_1(k+1|k) &= 2 \cdot Y(k) - Y(k-1), \\ Y_2(k+1|k) &= \\ &= (9 \cdot Y(k) - 4 \cdot Y(k-2) - 3 \cdot Y(k-4) + 3 \cdot Y(k-5)) / 5. \end{aligned}$$

Для совместного предсказания линейной, квадратичной и других зависимостей параметра  $Y(k)$  результаты экстраполяторов объединяются:

$$Y_\Sigma(k+1|k) = \sum_j \alpha_j \cdot Y_j(k+1|k),$$

где должно выполняться соотношение  $\sum_j \alpha_j = 1$ . Суммирование проводится по всем  $j$  вариантам экстраполяции. Значения  $\alpha_j$  выводятся из минимума ошибки предсказания:

$$\sigma^2 [Y_\Sigma(k+1|k)] = \left[ \sum_j \alpha_j \cdot Y_j(k+1|k) - Y(k+1) \right]^2.$$

Для линейного и квадратичного экстраполирования

$$Y(k+1|k) = \alpha_1 \cdot Y_1(k+1|k) + \alpha_2 \cdot Y_2(k+1|k),$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 [Y_\Sigma(k+1|k)] &= \\ &= [\alpha_1 \cdot Y_1(k+1|k) + \alpha_2 \cdot Y_2(k+1|k) - Y(k+1)]^2. \end{aligned}$$

Минимум этого выражения достигается при значениях коэффициентов

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \sigma^2 [Y_2(k+1|k)] / \\ &/ (\sigma^2 [Y_1(k+1|k)] + \sigma^2 [Y_2(k+1|k)]), \\ \alpha_2 &= \sigma^2 [Y_1(k+1|k)] / \\ &/ (\sigma^2 [Y_1(k+1|k)] + \sigma^2 [Y_2(k+1|k)]). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} Y_\Sigma(k+1|k) &= \\ &= \frac{\sigma^2 [Y_2(k+1|k)] \cdot Y_1(k+1|k) + \sigma^2 [Y_1(k+1|k)] \cdot Y_2(k+1|k)}{\sigma^2 [Y_1(k+1|k)] + \sigma^2 [Y_2(k+1|k)]}. \end{aligned}$$

С использованием доверительного веса выходное значение предсказанного параметра вычисляется по формуле

$$Y_{\text{вых}}(k+1|k) = [1 - W(k)] \cdot Y_\Sigma(k+1|k) + W(k) \cdot Y(k),$$

где доверительный вес нормирован так, что  $0 \leq W(k) \leq 1$ . Следовательно, если доверительный вес высок, т. е. условия слежения нормальные, то предсказывающее устрой-

ство более полагается на текущее значение параметра  $Y(k)$ , в противном случае происходит предсказание параметра по тем его значениям, которые он принимал до уменьшения доверительного веса. Экспериментальные данные показали, что характеристики данного метода предсказания аналогичны калмановской фильтрации.

Результаты применения предложенного методического аппарата можно сформулировать следующим образом:

- разработаны методика и алгоритм восстановления среднего значения уровня несущей частотно-манипулированного сигнала гистограммным методом после частотного детектора без использования БПФ или линейной фильтрации информационного параметра, что обеспечивает более высокие быстродействие и помехоустойчивость;

- проведена оценка работоспособности разработанных методики и алгоритма на реальной информации, которая показала значительное сокращение числа проводимых вычислительных операций при восстановлении среднего значения несущей сигнала и устойчивость алгоритма к шумам. Зависимость  $\hat{A}_n = (\Delta f)$  от расстройки несущей  $\Delta f$  является линейной;

- оценка уровня несущей сигнала не зависит от количества нулевых и единичных символов в передаваемой информации и не требует введения специальных посылок или маркеров для ее точного определения. Методика и алгоритм позволяют получить несмещенную оценку среднего уровня сигнала после частотного детектора при отклонении несущей частоты.

Таким образом, методика и алгоритм восстановления несущей частоты показали устойчивость, линейность и точность предложенного гистограммного метода оценки уровня несущей частоты и порога для принятия решения о значении принимаемого символа.

### Библиографические ссылки

1. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000.
2. Бортовая телеметрическая аппаратура космических летательных аппаратов / С. М. Переверткин, А. В. Кантов, Н. Ф. Бородин, Т. С. Щербакова. М., 1977.
3. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: пер. с фр. В 2 т. М.: Мир, 1983.
4. Макклеллан Дж., Рейдер Ч. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1983.
5. Свердлик М. Б. Оптимальные дискретные сигналы. М.: Сов. радио, 1975.
6. Радиотехнические системы передачи информации / В. А. Борисов, В. В. Калмыков, Я. М. Ковальчук и др. М.: Радио и связь, 1990.
7. Современная телеметрия в теории и на практике: учеб. курс. СПб.: Наука и техника, 2007.

## APPLIED METHOD FOR CARRIER FREQUENCY RESTORATION OF TELEMETRY SYSTEMS SIGNAL BY DIGITAL PROCESSING

*The paper considers the issue of restoring the level of the telemetry signal carrier frequency at digital processing in the automatic carrier control tract and the calculation of the threshold for taking the decision about the validity of received symbol of information from the spacecraft and carrier rocket. We describe the applied method and algorithm for calculating the level of the carrier frequency and the level of threshold for taking the decision based on histogram processing of the signal from the output of the frequency detector.*

*Keywords: control system, signal processing, telemetry.*

© Зайцев О. В., 2010

УДК 621.311

И. В. Игнатъев, А. Е. Ковров

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА НАСТРОЕК АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МНОГОМАШИННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

*Предложен программно реализованный алгоритм согласованного выбора настроек автоматических регуляторов возбуждения. Алгоритм основан на понятии результата и работает применительно к математической модели энергосистемы, сформированной по экспериментальным частотным характеристикам.*

*Ключевые слова: автоматический регулятор возбуждения, результат, устойчивость.*

Обеспечение устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) и демпфирование колебаний осуществляется автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ), которыми оснащены генераторы электростанций [1].

В настоящее время актуальна задача согласованного выбора коэффициентов стабилизации АРВ по условию обеспечения в многомашиной ЭЭС требуемого качества переходных процессов.

Для решения этой задачи ранее были разработаны алгоритмы [2–4], основанные на методе Д-разбиения. Эти алгоритмы предполагают поочередный для каждой станции выбор настроек АРВ по рассчитанным областям устойчивости. При этом переход от одной станции к другой осуществляется в направлении повышения степени устойчивости системы. Однако в связи со сложностью используемой целевой функции эти алгоритмы не всегда обеспечивают приемлемые демпферные свойства энергосистем с большим числом АРВ.

Другой подход к решению поставленной задачи заключается в использовании алгоритмов, которые основаны на расчете собственных значений матрицы коэффициентов линеаризованных дифференциальных уравнений Горева–Парка [5–7]. Но такие алгоритмы обладают недостатками, затрудняющими оперативное управление многомашиной ЭЭС. Они характеризуются высоким порядком дифференциальных уравнений и требуют значительного объема расчетов, а также допускают усреднение на значительных временных интервалах данных об элементах крупных узлов и подсистем ЭЭС, что часто приводит

к несоответствию формируемой математической модели и текущей режимной ситуации.

В работах [8; 9] было показано, что математическая модель ЭЭС может быть получена в виде характеристического полинома по экспериментальным частотным характеристикам параметров стабилизации. Такой подход позволяет избежать многих допущений и погрешностей моделирования, характерных для описанных выше расчетных методов, а также снизить размерность задачи выбора настроек АРВ, своевременно согласовав их с текущими условиями работы энергосистемы.

Авторами данной статьи предлагается новый алгоритм согласованного выбора настроек АРВ для многомашиных ЭЭС, который позволяет учесть достоинства решений, предложенных в [8; 9], и исключить недостатки разработанных ранее алгоритмов. Программная реализация нового алгоритма проведена в среде MatLab.

**Описание алгоритма согласованного выбора настроек АРВ.** Разработанный авторами алгоритм основан на понятии результата [10]. *Результатом* называется функция коэффициентов двух многочленов, обращение которой в нуль является условием, необходимым и достаточным для существования общего корня этих многочленов.

В качестве первого многочлена рассмотрим характеристический полином исследуемой энергосистемы

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_{n-1} p + a_n, \quad (1)$$

в коэффициенты которого входят настройки каналов стабилизации АРВ. В общем виде можно записать