

© Кукушкин С.С., Хромов О.Е.
Kukushkin S., Khromov O.

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ПРИ ПРИЕМЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИМВОЛОВ ДВОИЧНОГО КОДА

NEW TECHNOLOGY OF RESTORATION OF BEARING FREQUENCY OF A SIGNAL DURING A RECEPTION OF THE TELEMETERING INFORMATION ON THE BASIS OF DIGITAL PROCESSING OF SYMBOLS OF A BINARY CODE

Аннотация. Статья посвящена проблеме восстановления уровня несущей частоты телеметрического сигнала при цифровой обработке для повышения точности автоматической подстройки частоты (АПЧ). Основу повышения точности работы АПЧ составляет адаптивная процедура вычисления порога, позволяющего принимать решение об истинности принятого символа двоичного кода информации. Представлены методика и алгоритм вычисления уровня несущей частоты, уточненные значения которого используют для управления порогом разделения символов. В отличие от известных подходов определение уточненного уровня осуществляется на основе гистограммной обработки сигнала с выхода частотного детектора.

Annotation. The article is devoted to a problem of restoration of a level of the major frequency of a telemetering signal during a digital processing to increase an accuracy of automatic tuning of frequency (ATF). The basis of increase of ATF work accuracy is an adaptive procedure of calculation of the error, that allows to arrive at a decision of the validity of the accepted symbol of a binary code of the information. The technique and the algorithm of a calculation of a level of the main frequency, the exact values of which are used for a management of a barrier of symbols division are presented in the article. Definition of the specified level is carried out on a basis of the probabilistic processing of a signal at an exit of the frequency detector, unlike it is described in another known approaches.

Ключевые слова. Телеметрия, обработка сигналов, идентификация символов двоичного кода, адаптивное управление порогами распознавания.

Key words. Telemetry, processing of signals, identification of symbols of a binary code, adaptive management of recognition limits.

Существующие проблемы в области информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) испытаний ракетно-космической техники (РКТ) таковы, что без новых технологий, направленных на повышение эффективности передачи и приема телеметрической информации (ТМИ), нельзя найти приемлемое разрешение противоречий, составляющих их суть.

Возможности традиционных методов не безграничны и в настоящее время они уже фактически исчер-

паны. А новых технологий, которые бы отвечали потребностям практики, недостаточно. При этом в наименьшей степени проработаны вопросы повышения эффективности приема ТМИ на основе обработки поступающих символов двоичного кода.

Ориентация на создание адаптивных систем, идеи которых неоднократно провозглашались применительно к телеметрии, требует разработки большого множества различных подходов, методов, технологий, методик

Кукушкин Сергей Сергеевич – ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России, доктор технических наук, профессор, тел.+7(495)515-19-82;

Хромов Олег Евгеньевич – кандидат технических наук, заместитель Генерального конструктора ОАО «Российские космические системы», тел. +7(495)673-41-28.

Kukushkin Sergey – the main scientific employee 4 Central Scientific Research Institute Ministry of Defence of Russia, doctor of the technical sciences, professor. Ph. +7(495)515-19-82;

Khromov Oleg – The chief of the sector of Open Jointstock Company «Russian Space Systems», candidat of the technical sciences, tel. +7(495)673-41-28.

и алгоритмов. В этом заключается одна из причин того факта, что перспективные идеи адаптации в телеметрии так и не были реализованы.

Одна из наиболее известных технологий управления качеством принимаемой информации предполагает использование автоматической подстройки частоты (АПЧ) при приеме частотно-модулированных (ЧМ) сигналов. Однако она недостаточно эффективно работает при приеме цифровой информации, представленной двоичными символами «0» и «1».

Современные наземные малогабаритные приемно-регистрирующие станции, такие как МПРС, МРТК и ИСТОЧНИК-ТМС (разработчики ОКБ МЭИ, ОАО «Российские космические системы» и ОАО НПП «Мера», соответственно), предусматривают обработку принимаемых сигналов ТМИ с целью повышения устойчивости выделения и идентификации символов двоичного кода. Применительно к отечественной практике телеизмерений обработка принимаемых сигналов представляет собой элемент новой технологии приема ТМИ, которая в настоящее время еще далека от совершенства. Ее суть заключается в том, чтобы в реальных условиях помеховой обстановки научиться более точно определять значения несущей в тракте АПЧ для установления наиболее подходящего порога оценивания достоверности принимаемых решений, относящихся к опознаванию (идентификации) символов двоичного кода (оптимального по отношению к наблюдаемой смеси сигнал + шум).

Предложенные в статье методика и алгоритм обработки видеосигнала, отображающего принятые символы двоичного кода, позволяют определять текущие значения несущей частоты принимаемого телеметрического сигнала с целью последующего их использования в системе АПЧ приемника. В статье показано, что при этом соблюдаются требования всех нормативных документов по оперативности работы приемника и обеспечении требуемого уровня его помехозащищенности. Возможность существенного повышения показателей эффективности приема и распознавания символов двоичного кода проверена в различных условиях передачи ТМИ.

В мировой практике телеизмерений рассматриваемая технология реализована с использованием традиционных подходов к цифровой обработке сигналов, основанных на методах быстрого преобразования Фурье и на линейной фильтрации выделяемых из группового телеметрического сигнала (ГТС) информационных телеметрируемых параметров. Основной недостаток известных подходов заключен в том, что они требуют больших вычислительных и временных затрат и поэтому оказы-

ваются неприменимыми в современных высокоскоростных системах передачи ТМИ.

По этой причине они не могут быть использованы в высокоинформативных телеметрических комплексах, которые разработаны для ИТО испытаний перспективных образцов РКТ.

Предлагается новый адаптивный алгоритм определения текущего значения несущей частоты передаваемых ГТС, представленных на уровне радиосигналов. Его основу составляет построение гистограмм при статистической обработке сигнала, формируемого на выходе частотного детектора. Показано, что предлагаемые методика и алгоритм восстановления несущей радиосигнала на основе гистограммного метода требуют при реализации значительно меньших по сравнению с БПФ вычислительных затрат, благодаря чему существенно повышается помехоустойчивость опознавания символов двоичного кода.

Полученные результаты обладают теоретической новизной и представляют ценность при практическом использовании. Особую значимость подобная технология обработки символов приобретает при передаче ТМИ с использованием многоосновных кодов и новых методов модуляции сигналов, которые уже находят применение в мировой практике телеизмерений. Без перехода на подобные технологии не представляется возможным удовлетворение быстрорастущих требований, предъявляемых к качеству ИТО испытаний перспективной РКТ.

Контроль правильности отработки полетного задания бортовыми системами РН и 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 радиосигнала и вычислить порог принятия решения для достоверного определения принимаемого символа информации («0» или «1»).

В настоящее время в цифровых трактах приемных устройств для восстановления несущей радиосигнала с частотной манипуляцией чаще всего используются быстрое преобразование Фурье (БПФ) или линейная фильтрация информационного параметра [2]. Использование БПФ требует большого количества производимых операций для получения необходимого результата и, следовательно, значительного времени для проведения анализа сигнала. При линейной фильтрации весьма сложно получить несмещенную оценку обрабатываемого параметра. Кроме того, применение традиционных методов (БПФ и линейной фильтрации) при обработке сигнала

на фоне сильных шумов не позволяет достоверно определять несущую радиосигнала [3], что значительно снижает чувствительность цифровых радиоприемных трактов.

Существуют несколько перспективных направлений повышения эффективности решения задач АПЧ. Первое среди них заключается в том, чтобы повысить оперативность традиционных методов, основанных на БПФ и линейной фильтрации. Такую возможность предоставляет разработка методов, направленных на прикладное использование математического аппарата теории конечных полей (ТКП) [4, 8, 9]. Второе направление ориентировано на такую новую область прикладного ее использования, как статистическая обработка дискретных значений данных, представляющих собой результаты кодирования. Оно и составляет основу проведенного исследования.

Без преувеличения можно сказать, что конечные поля представляют собой одну из достаточно быстро развивающихся теорий современной алгебры. Интерес к ним возрастает в связи с прогрессом в области информационно-измерительных и вычислительных систем, автоматизированных систем управления и связи, а также работами в области искусственного интеллекта. Известны их традиционные приложения, к которым относятся комбинаторика, теория кодирования, синтез дискретных оптимальных сигналов [5], математическая теория переключательных схем [8]. Но наибольшую практическую значимость ТКП получила как мощное средство повышения оперативности вычислений [8]. Поэтому она может быть использована и для построения сверхбыстрых алгоритмов БПФ и фильтрации сигналов.

Методика восстановления уровня несущей частоты сигнала разработана на основе гистограммного метода. Суть 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 блоке построения гистограммы 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. Формируется одномерный вектор (вектор числа попаданий уровня сигнала в интервал $\Delta(k)$), значения которого представлены гистограммой $H(k)$. Параллельно формируется вектор аккумуляторов – $S(k)$ или вектор накопленной суммы уровней сигнала, появляющегося в интервале $\Delta(k)$. По значениям гистограммы уровней сигнала опре-

деляются максимумы верхнего и нижнего уровней сигнала. На следующем шаге на основе значений максимумов $H(k)$ и соответствующих ему значениям накопленных сигналов $S(k)$ вычисляется среднее значение верхнего (или нижнего) значения уровня сигнала (см. рисунок).

На рисунке изображен сигнал на выходе частотного детектора $A(t)$ типичного двоичного приемника и соответствующая ему гистограмма. Верхнему уровню сигнала A_1 и нижнему – A_0 на гистограмме $H(k)$ соответствуют два максимума. Значения максимумов определяются количеством единичных и нулевых символов в информационной посылке, подсчитанном на выбранном интервале оценки. При этом при равенстве количества «1» и «0» высота максимумов одинакова. Вследствие увеличения уровня шумов максимумы гистограммы сближаются и в пределе сливаются в один максимум, который соответствует распределению среднего уровня сигнала и шумов. Расстояние между максимумами определяется размахом сигнала $\Delta = A_1 - A_0$. Середина расстояния $(A_1 + A_0)/2$ является уровнем несущей и зависит только от расстройки частоты. Она также является оптимальным порогом для решающего устройства, квантующего аналоговый сигнал частотного детектора на два уровня «1» и «0». Сигнал $D(t)$ на выходе схемы принятия решения, изображенный на рисунке является бинарным образом сигнала $A(t)$.

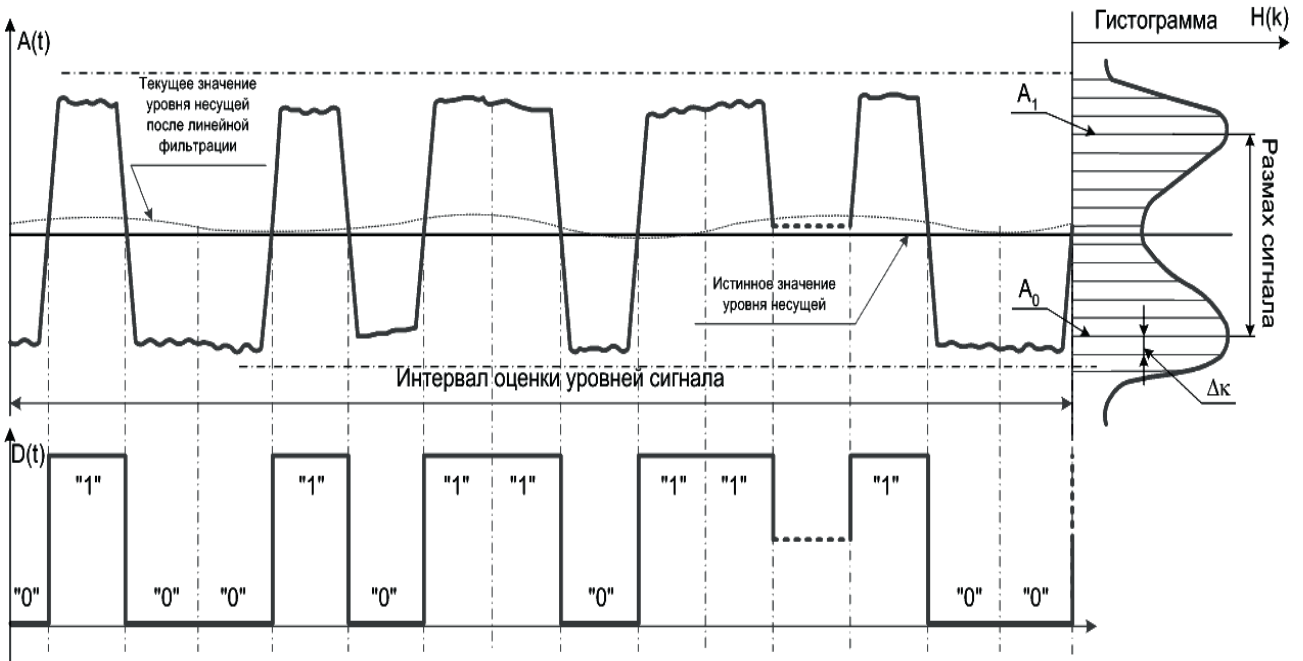
Количество единиц и нулей в информационной посылке в течение какого-либо периода может сильно различаться. Количественный максимум единиц (или нулей), как показано на гистограмме рисунка справа, будет определять среднее текущее значение уровня сигнала единицы (нуля). Расстояние между уровнями сигнала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

Таким образом, новая технология восстановления уровня несущей гистограммным методом включает в себя следующие этапы.

1. Определение интервала, на котором производится оценка уровней сигналов «единиц» и «нулей» двоичного кода. Установлено, что наилучшие оценки получают на временном промежутке времени, совпадающем по длительности с интервалом накопления значений сигнала, результаты которого используют при автоподстройке частоты. Это связано с тем, что на данном интервале уровень сигнала подвержен наименьшим искажениям.

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 вы-



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

числение среднего текущего значения уровня несущей.

4. Восстановление принятого сигнала.

Основной положительный эффект, который достигается при применении новой технологии автоподстройки частоты, заключается в следующем:

- реализуется линейная зависимость оценки уровня несущей от расстройки частоты;
- обеспечивается возможность получения несмещенной оценки среднего уровня несущей, в результате чего её значение не зависит от количества «1» и «0» в информационном сообщении;
- повышается устойчивость алгоритма восстановления уровня несущей, в том числе и при высоком уровне шумов.

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 «0» и «1».
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 отчетов соответствующих уровней, $\hat{A}_H = (\hat{A}_0 + \hat{A}_1) / 2$ – оценка среднего уровня несущей частоты, которая поступает на экстраполятор.

Введем обозначения:

$\hat{A}_H(k) = Y(k)$ – оценка уровня несущей в k -й момент времени;

$\hat{A}_H(k+1|k)$ – выходное значение экстраполятора, которое является оптимальным порогом для схе-

мы принятия решения (схема принятия решения квантует отсчеты частотного детектора на символы «0» и «1»).

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 ($r=5$):

$$Y_1(k+1|k) = 2 \cdot Y(k) - Y(k-1);$$

$$Y_2(k+1|k) = (9 \cdot Y(k) - 4 \cdot Y(k-2) - 3 \cdot Y(k-4) + 3 \cdot Y(k-5)) / 5.$$

Для совместного предсказания линейной, квадратичной и т.д. 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 условие нормирования: $\sum_j \alpha_j = 1$. Суммирование проводится по всем j вариантам экстраполяции.

Значения α_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:

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

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

Минимум указанного выражения достигается при следующих значениях коэффициентов:

$$\alpha_1 = \sigma^2 [Y_2(k+1|k)] / (\sigma^2 [Y_1(k+1|k)] + \sigma^2 [Y_2(k+1|k)]);$$

$$\alpha_2 = \sigma^2 [Y_1(k+1|k)] / (\sigma^2 [Y_1(k+1|k)] + \sigma^2 [Y_2(k+1|k)]),$$

следовательно,

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

С использованием доверительного веса выходное значение предсказанного параметра вычисляется по следующей формуле:

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

где доверительный вес нормирован так, что $0 \leq W(k) \leq 1$. Следовательно, если доверительный вес высок (условия слежения нормальные), то предсказывающее устройство 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. Результаты экспериментов показали, что характеристики данного метода предска-

ния аналогичны калмановской фильтрации.

Коротко результаты изложенного методического аппарата можно сформулировать следующим образом.

1. 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 высокие требования по быстродействию и помехоустойчивости.

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

Оценка уровня несущей частоты не зависит от количества нулевых и единичных символов в передаваемой информации и не требует введения специальных посылок или маркеров для её точного определения. Метод позволяет получить несмещенную оценку среднего уровня сигнала после частотного детектора при отклонении несущей частоты.

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

Литература

1. Соловьев, Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. 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: В 2-х томах / Пер. с франц. - М.: Мир, 1983. - 642с.
4. Макклеллан Дж., Рейдер Ч. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов / Пер. с англ. - М. Радио и связь. 1983. - 376с.
5. Свердлик М.Б. Оптимальные дискретные сигналы. - М.: Сов. Радио, 1975. - 200с.
6. Борисов В.А., Калмыков В.В., Ковальчук Я.М. и др. Радиотехнические системы передачи информации. - М.: Радио и связь, 1990. - 456с.
7. Современная телеметрия в теории и на практике. Учебный курс. - СПб.: Наука и Техника, 2007. - 672с.
8. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: том.1 Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках - М.: МО РФ, 2003. - 281с.
9. Кукушкин С.С. Синтаксическое сжатие передаваемых данных /Двойные технологии №1, 2005. - с.34 - 38.

Материал поступил в редакцию 19. 11. 2010 г.