АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 3 1968

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АВТОМЕТРИИ

УДК 62-503

А. М. ЗАЕЗДНЫЙ, К. Н. ЩЕЛКУНОВ

(Ленинград)

ПОЛУЧЕНИЕ, СЖАТИЕ И ДИАГНОСТИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ*

В общем виде задача сжатия измерительной информации охватывает не только вопросы экономной передачи результатов измерений, но и вопросы получения измерительной информации в максимально сжатом виде; в равной степени к этой задаче относятся и вопросы диагностики измерительной информации. Рассмотрению трех групп вопросов, связанных с получением, сжатием и диагностикой измерительной информации, и посвящена настоящая работа.

Задачу измерений можно трактовать как задачу, имеющую очень много общего с задачей приема известного сигнала с неизвестными параметрами; при таком подходе можно полнее использовать априорную информацию о результатах измерений. В общем виде задача ставится так: в сигнале

$$s\,(t;\,a_1,\ a_2,\ \ldots,\ a_n,\ \ldots,\ a_N) \tag{1}$$

нужно измерять текущие значения параметров a_n, по которым сигнал $s(t)$ может быть восстановлен с заданной точностью. Следует подчеркнуть, что вид функции s в практических условиях всегда может считаться известным.

Известный путь решения общей задачи состоит в представлении

$$s\,(t) = \sum_{n=0}^{N} A_n\,\varphi_n\,(t), \tag{2}$$

в котором коэффициенты A_n связаны с a_n, но вычисляются по $\varphi_n\,(t)$ и $s(t)$. Этот путь не вскрывает «внутренних» свойств сигнала и, как правило, приводит к избыточности. Исключение составляет случай, когда $A_n = a_n$, т. е. когда выбранные координатные функции $\varphi_n(t)$ адекватны природе сигнала; при этом избыточность наименьшая.

Таким образом, следует искать общий и наиболее экономный путь решения задачи «параметрометрии» — задачи измерения отдельных па-

---

* Материал доложен на I Всесоюзном симпозиуме по проблемам сокращения объема измерительной информации в феврале 1967 года в Новосибирске.

раметров, каждый из которых определяет поведение результатов измерений; нужна совокупность приборов — параметрометров.

Измерения, связанные с периодическими кривыми, т. е. гармонический анализ, дают ясное представление о задаче; набором параметрометров здесь является набор фильтров, образующих спектрометр. В задачах, связанных с непериодическим движением, можно иметь в виду приборы, которые дают сведения только о скорости, только об ускорении, только об экстремумах тех или иных величин и т. п.

С целью создания такой параметрометрии предлагается использовать не контурные, а структурные свойства измеряемых величин.

Под контурными понимаются свойства самой функции $s(t)$, а также свойства $s^{(r)}(t)$, т. е. производных порядка r или интегралов порядка $(-r)$; интегральные или другие функциональные преобразования исходной функции $s(t)$ также дают информацию о контурных свойствах. Другими словами, под контурными понимаются свойства временной картины или спектра данной функции.

Под структурными будем понимать свойства, которые определяются связями между производными; для сигнала вида (1) эти свойства определяются зависимостями

$$s^{(p)}\,[s^{(r)};\ t;\ a_1,\ a_2, \ldots,\ a_n, \ldots,\ a_N], \tag{3}$$

в которые в общем случае время t может входить в явном виде (нестационарные связи); если время t в явном виде не входит (стационарные связи), т. е.

$$s^{(p)}\,[s^{(r)};\ a_1,\ a_2, \ldots,\ a_n, \ldots, a_N], \tag{4}$$

то соотношения (4) определяются как фазовые изображения порядка $p-r$ | и степени r. При $p=1$ и $r=0$ приходим к хорошо известному фазовому изображению $\dot{s}(s)$.

Рассмотрение и оценка измеряемых величин под углом зрения структурных свойств открывают новые возможности. Такой подход позволяет взглянуть на теорию сигналов через призму дифференциальных соотношений, определяющих сигнал. По существу дела здесь идет речь о двучленных дифференциальных уравнениях, решениями которых является изучаемый сигнал.

Оказывается, что число таких дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, т. е. соответствующих стационарным связям вида (4), является конечным, а число дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, т. е. соответствующих нестационарным связям вида (3),— бесконечным. Для целей параметрометрии предполагается использовать только стационарные связи — фазовые изображения.

Образуем функциональное пространство фазовых изображений в виде

$$\Gamma_M\,\{s^{(p)}\,[s^{(r)};\ a_1,\ a_2, \ldots,\ a_n, \ldots,\ a_N]\}, \tag{5}$$

которое представляет собой совокупность M неповторяющихся фазовых изображений функции $s(t)$. Такую совокупность будем называть галереей фазовых изображений.

На рис. 1 в качестве примера изображен сигнал

$$x\,(t) = a\left(\sin\omega\, t + \frac{1}{2}\sin 3\omega\, t\right)$$

и галерея, состоящая из десяти неповторяющихся фазовых изображений различных степеней и порядков. Точками сверху обозначена операция дифференцирования $x(t)$, а точками снизу — операция интегрирования. В правом верхнем углу каждого элемента галереи указывается наименование плоскости: символ D соответствует дифференцированию, а I — интегрированию; индексы указывают порядок операций.

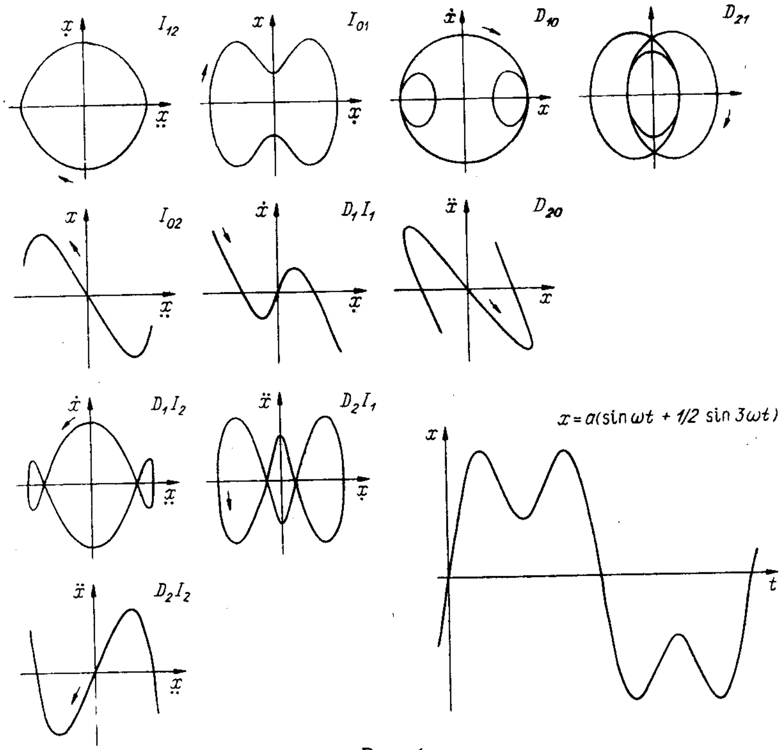

Рис. 1.

Введем теперь нормированное функциональное пространство

$$\Gamma_M \{\hat{s}^{(p)} [\hat{s}^{(r)}; \hat{a}_1, \hat{a}_2, \ldots, \hat{a}_n, \ldots, \hat{a}_N]\}, \qquad (6)$$

в котором нормировка осуществлена к единичному квадрату как для функций $s^{(r)}$, $s^{(p)}$, так и для параметров $a_1, a_2, \ldots, a_N$. Операция нормировки обозначается символом $\wedge$. Практически это означает, что значения функций и параметров нормируются к своим максимальным значениям.

В качестве единичного квадрата можно представить себе экран осциллографа, а операцию нормировки должны выполнять усилители в цепях горизонтальных и вертикальных отклоняющих пластин.

Для такого функционального пространства нетрудно ввести удобную метрику; в частности, введем «расстояние по параметру a_n», определяемое равенством

$$R_n^{p,r} = \hat{a}_{n2} - \hat{a}_{n1}, \qquad (7)$$

где a_{n2} — значение параметра a_n изучаемого сигнала, а a_{n1} — некоторого пробного сигнала, который в частном случае может быть принят равным нулю.

Оптимальной по параметру a_n назовем плоскость, соответствующую фазовому изображению

$$s^{(p)}\,[s^{(r)}]$$

с такими значениями p и r, при которых максимизируется расстояние $R_n^{p,\,r}$.

На рис. 2 дан пример двух сигналов:

$$x_1(t) = \sin\omega t,$$

$$x_2(t) = \sin\omega t + \frac{1}{18}\sin 3\omega t,$$

которые на плоскостях $x,\ t$ практически неразличимы. В равной степени почти неразличимы фазовые изображения на плоскостях $\dot{x},\ x$, т. е. $\dot{x}_1(x_1)$ и $\dot{x}_2(x_2)$. Однако фазовые изображения $\ddot{x}_1(x_1)$ и $\ddot{x}_2(x_2)$ отличаются весьма существенно и, таким образом, в данной галерее плоскость с $p=2$ и $r=0$ является оптимальной. Можно показать (это выходит за пределы возможностей в данной статье), что эта плоскость является оптимальной для любой галереи, соответствующей выбранным сигналам: другие фазовые изображения могут привести к изменению масштаба, но не более того.

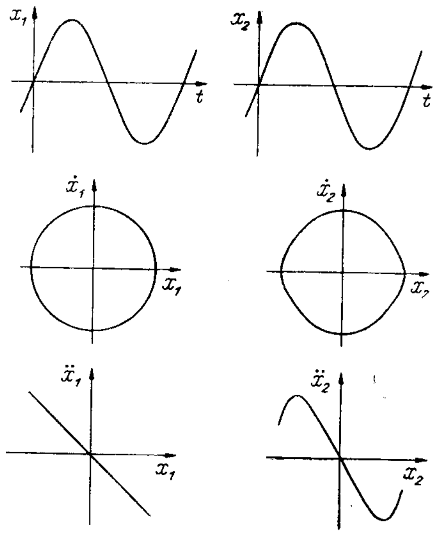

Рис. 2.

Этим примером показана принципиальная возможность создания приборов типа параметрометров; конечно, реализация этих приборов может строиться различными путями и в качестве регистрирующих приборов могут быть и стрелочные приборы. На рис. 3 в качестве примера приведена подобная схема. В качестве фазового изображения здесь принято изображение $x(\underset{\cdot\cdot}{x})$, которое имеет примерно такой же вид, что и изображение $\ddot{x}(x)$, а с точки зрения реализации лучше, так как интеграторы удобнее дифференциаторов.

Так как в данном случае $x = a_1\sin\omega t + a_3\sin 3\omega t$,

$$\underset{\cdot\cdot}{x} = -\frac{a_1}{\omega^2}\sin\omega t - \frac{a_3}{9\omega^2}\sin 3\omega t,$$

легко получить равенство

$$\omega^2\underset{\cdot\cdot}{x} + x = \frac{8}{9}a_3\sin 3\omega t,$$

на основе которого можно построить реализационную схему в общепринятых обозначениях (см. рис. 3). Выходная величина непосредственно соответствует значениям измеряемого параметра a_3. Важно обратить внимание на то, что не подлежащий измерению параметр a_1 исключен из схемы.

До сих пор шла речь о получении измерительной информации; перейдем теперь к проблеме ее сжатия. Уточним смысл операции сжатия информации.

Представим сигнал, несущий измерительную информацию (как до, так и после ее получения), в виде многомерного вектора в гильбертовом пространстве $s_m(t)$, где $m=2FT$ — база сигнала; для восстановления сигнала нужно через промежутки времени $\Delta t=\frac{1}{2F}$ передавать значения определяющих ординат $s(\mu\Delta t)$. Однако вместо ординат $s(\mu\Delta t)$ можно передавать значения параметров a_n вместе со служебной информацией, с помощью которой текущее значение параметра сопоставляется с текущим временем. Число передаваемых значений параметра должно быть достаточным для восстановления сигнала $s(t)$ с заданной точностью.

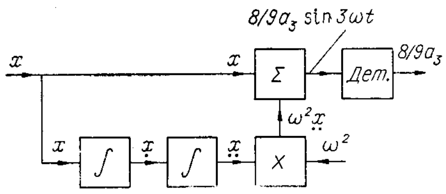

Рис. 3.

Как в первом, так и во втором случае можно ставить вопрос о сжатии информации, состоящем в уменьшении объема передаваемой информации, но без ущерба для точности в ее восстановлении. Очевидно задача сжатия информации не совпадает с задачей устранения избыточности. Задача сжатия, по существу, состоит в том, чтобы не передавать повторяющиеся значения сигнала, будь то значения ординат или параметров. Уверенно можно утверждать, что целям сжатия информации в большей степени соответствует измерение параметров, чем измерение ординат. В этом может убедить, например, задача измерения периодического сигнала, состоящего из постоянной составляющей и ряда гармоник.

В общем виде оценка выигрыша при измерении параметров по сравнению с измерением ординат вряд ли может быть сделана, так как эта оценка существенно зависит от вида сигнала и априорной информации; однако выигрыш будет всегда, так как в пределе (при полном отсутствии априорной информации) ординаты могут играть роль параметров.

Для реализации сжатия информации нужно передавать значения только тех параметров, которые подвергаются изменениям. Однако эти слова следует адресовать не только к передаче измерительной информации, но и к собственно измерениям. Измерительный агрегат, представляющий собой совокупность параметрометров, должен выдавать результаты измерений параметров только тогда, когда параметры подвергаются изменениям; этим и обеспечивается решение задачи сжатия информации.

В предложенной постановке решается задача сжатия информации не только в процессе ее передачи, но и в процессе ее получения.

Все изложенное выше относится и к задаче диагностики результатов измерений. Обычно, когда результаты измерений передаются в виде совокупности ординат, для диагностики нужно эти результаты специально обрабатывать (например, вычислять коэффициенты Фурье). Если же результаты измерений представляют собой совокупность значений параметров, проблемы диагностики не возникает.

Таковы в общих чертах возможности, которые открываются в технике измерений при использовании структурных свойств измеряемых сигналов.

Поступила в редакцию
3 июля 1967 г.