

В. А. ВИТТИХ, А. М. ЗАЕЗДНЫЙ

(Новосибирск, Ленинград)

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
СЖАТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ
И ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИМАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ**

ВВЕДЕНИЕ

Первые работы в области сокращенного (экономного) представления измерительной информации относятся к началу шестидесятых годов; тем не менее в наши дни уже применяются устройства, предназначенные для этой цели, и внимание к ним неуклонно растет. Причины этого лежат в грандиозном увеличении возможностей обработки результатов измерений, что, в свою очередь, привело к существенному росту объема измерительной аппаратуры и вместе с ней к росту объема измерительной информации, передача которой по имеющимся каналам связи встречает серьезные затруднения.

Несмотря на успехи в деле создания систем сокращенного представления измерительной информации, которые теперь уже принято называть системами сжатия измерительной информации, некоторые общетеоретические положения проблематики сжатия остаются неясными и являются предметом дискуссий.

Симпозиум по проблемам сокращения измерительной информации, проведенный в феврале 1967 года в Новосибирске, показал, что в настоящее время нет единой точки зрения в формулировке задачи сжатия, нет ясного представления о количественной оценке сжатия и нет методики сравнения устройств сжатия.

Представляется необходимым внести ясность в эти вопросы; точка зрения авторов излагается в настоящей статье.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
СЖАТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Под измерительной информацией понимаются результаты измерений конкретного прибора, данные в виде детерминированных функций времени. Эти функции можно называть измерительными сигналами — дискретными или непрерывными. Реальные сигналы в силу инерционности измерительной аппаратуры характеризуются ограниченным спектром и имеют ограниченные производные.

Любой подобный сигнал на отрезке $[0, T]$ может быть представлен в виде функции

$$s(t; a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_N),$$

содержащей N параметров. Параметры $\{a_k\}_{k=1}^N$ могут быть отсчетами самой функции, коэффициентами какого-либо ряда и т. д. Совокупность N параметров позволяет восстановить сигнал точно [приближение может содержаться в аппроксимации заданного сигнала функцией $s(t)$].

Задача сжатия в общем виде состоит в представлении заданного сигнала $s(t; a_1, a_2, \dots, a_N)$ некоторым набором чисел $\{b_1, b_2, \dots, b_M\}$ по которым он может быть восстановлен в зависимости от условий сжатия — либо точно, либо с заданной погрешностью. Таким образом, задача сжатия состоит в преобразовании измерительной информации. Если в результате преобразования $M < N$, имеет место сжатие информации; если же $M = N$, то — обычная дискретизация. Устройства, осуществляющие преобразование по условию $M < N$, называют адаптивными дискретизаторами или сжимателями измерительной информации. Отдадим предпочтение последнему термину.

Необходимо подчеркнуть, что к проблематике сжатия не относятся каналы связи, по которым передается сокращенная информация: сфера сжимателей ограничивается выходом измерительного прибора и входом канала связи.

При такой постановке мы исходим из предположения, что измерительный прибор задан; вообще говоря, создание измерительного прибора может быть подчинено интересам сжатия информации (этот аспект общей проблемы рассматривается ниже).

Возможна частная постановка общей задачи сжатия, которую мы будем называть диагностическим сжатием. Речь идет о текущей диагностике измерительной информации и передаче только тех ее значений, которые по определенным признакам представляют интерес. Здесь нет задачи восстановления всего сигнала: нужно располагать данными для восстановления только «интересных участков» сигнала. Простейшим примером может служить совокупность датчиков, измеряющих напряжение в различных точках некоторой конструкции; интерес представляют только те показания, которые близки к критическим.

ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ СЖАТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В общем случае параметры a_k являются функциями времени и именно текущие значения параметров полностью описывают сигнал $s(t)$. В пределах отдельных отрезков времени параметры $a_k(t)$ могут оставаться неизменными (изменяться в пределах допуска); если не регистрировать (не передавать) значения параметров, совпадающие с предшествовавшими, т. е. остающиеся постоянными на некотором отрезке времени, то в результате такого преобразования число выходных параметров M будет меньше числа входных параметров N ; именно в этом и состоит сжатие.

Таким образом, сжиматели должны производить измерения текущих значений параметров $a_k(t)$ и регистрировать эти значения только тогда, когда разность превосходит определенный порог. Очевидно, вместе с информацией о значениях параметра должна передаваться

информация о времени, соответствующем этому изменению («метки времени»); эту информацию обычно называют служебной.

Параметры a_k могут, как уже указывалось, представлять собой как отсчеты мгновенных значений сигнала в дискретные моменты времени, так и коэффициенты разложения сигнала по некоторым функциям. Соответствующие операции сжатия можно условно называть «сжатием по отсчетам» и «сжатием по коэффициентам»*.

Адекватным математическим аппаратом для сжатия по отсчетам являются конечные разности. Реализационное направление, соответствующее этому математическому аппарату, в теории связи получило название «дельта-модуляции», а в теории дискретизации «разностно-дискретной модуляции». Распространенные сжиматели строились в основном именно по этому хорошо разработанному направлению.

По условиям, когда роль параметров выполняют коэффициенты разложения, аппарат конечных разностей может оказаться неподходящим. Здесь определяющим является условие приближения, по которому производится выбор коэффициентов — параметров. Обычно для определения этих коэффициентов нужен более протяженный отрезок, чем тот, который нужен для сжатия двух отсчетов при использовании сжатия по отсчетам. Таким образом, сжатие по коэффициентам сопровождается запаздыванием по отношению к сжатию по отсчетам. Однако при сжатии по коэффициентам весьма часто непринужденно появляется дополнительная информация о свойствах сигнала, которую при сжатии по отсчетам можно получить только после специальной обработки**.

Представляется, что второе направление является более перспективным, несмотря на относительную сложность. Важно отметить, что при сжатии по коэффициентам выбор разностного порога между значениями коэффициентов может зависеть от физических характеристик изучаемого процесса и, следовательно, теоретически обоснован; выбор разностного порога между значениями отсчетов может быть обоснован только серией экспериментов.

ОЦЕНКА СЖАТИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИМАТЕЛЕЙ

Оценка сжатия адресуется к сигналу и должна отражать соотношение между числами N (число параметров сигнала до сжатия) и M (число параметров того же сигнала после сжатия) при фиксированной точности воспроизведения сигнала.

В качестве такой оценки можно предложить «коэффициент сжатия», определяемый формулой

$$K = 1 - \frac{M}{N}. \quad (1)$$

Запись (1) удобна тем, что $0 \leq K \leq 1$. Число N рассчитывается по заданному сигналу. Для расчета числа N может использоваться известная формула «базы сигнала»:

$$N = 2F_{\max} T, \quad (2)$$

* Возможны также и операции сжатия по коэффициентам, когда сигнал задан отсчетами; обратная ситуация вряд ли может встретиться.

** Например, при сжатии по коэффициентам Фурье появляется дополнительная информация о спектральном составе измерительного сигнала.

где T — длительность сигнала, а F_{\max} — наивысшая частота спектра данного сигнала (с хорошо известными допущениями, примиряющими «ограниченность спектра с конечной протяженностью сигнала»).

Определение F_{\max} в практических условиях встречает серьезные затруднения; более удобной является оценочная формула [1]

$$N \leq 2 \frac{s'_{\max}}{s_{\max}} T,$$

в которой s_{\max} и s'_{\max} — максимальные значения сигнала и его первой производной. Для расчета можно принять максимальное значение N , т. е. записать

$$N = 2 \frac{s'_{\max}}{s_{\max}} T. \quad (3)$$

Из (2) и (3) непосредственно следует, что число параметров N выбирается по предельным характеристикам наиболее «острых» участков сигнала. Анализ текущих структурных свойств сигнала позволяет экономить информацию на всех более «спокойных» участках сигнала.

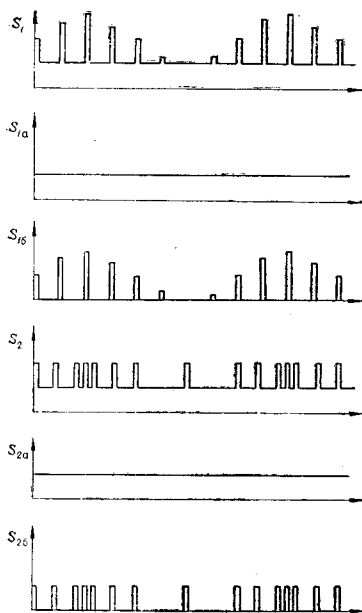
Перейдем теперь к вопросу оценки устройств, реализующих сжатие, т. е. к характеристикам сжимателей.

Первая характеристика сжимателя должна отвечать на вопрос, какой коэффициент сжатия, рассчитанный по (1), обеспечивается данным сжимателем при заданной точности восстановления сигнала. Точность восстановления зависит от разрешающей способности сжи-

мателя как по времени, так и по уровню сигнала. Поэтому для сравнительной оценки сжимателей нужно проводить испытания на одинаковых пробных сигналах совершенно так же, как проводятся испытания любых информационных электрических устройств. Для оценки сжимателей нужны свои пробные сигналы, позволяющие измерять характеристики по разрешающей способности.

В качестве пробных сигналов предлагается принять сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$, изображенные на рисунке. Каждый из этих сигналов представляет собой сумму сигнала постоянного уровня (s_{1a} и s_{2a}) и либо амплитудно-модулированного импульсного сигнала (s_{1b}), либо частотно-модулированного импульсного сигнала s_{2b} . Такие сигналы легко создаются с помощью распространенных измерительных генераторов. Параметры пробных сигналов должны устанавливаться соглашением между заинтересованными сторонами. Сигнал s_1 позволяет установить разрешающую способность по уровню, а сигнал s_2 по времени.

Таким образом, первая характеристика сжимателя формулируется так: сжиматель обеспечивает сжатие с коэффициентом K и точностями — по времени Δt и по уровню Δs .



Вторая характеристика сжимателя должна отвечать на вопрос, связанный с запаздыванием массива информации, необходимого для восстановления сигнала. Это запаздывание определяется временем τ , необходимым для определения (вычисления) совокупности параметров $\{b_m\}$, преобразованных из совокупности параметров $\{a_k\}$. Как уже указывалось, при сжатии по коэффициентам запаздывание будет большим, чем при сжатии по отсчетам.

Вторая характеристика сжимателя формулируется так: сжиматель обеспечивает выдачу преобразованной информации с запаздыванием, не превосходящим время τ_0 .

Остальные характеристики, относящиеся к сложности, габаритам, весам, условиям питания и др., формулируются обычным образом.

Следует отдельно указать на характеристики, связанные со служебной информацией («метки времени»). Вместе с данными об изменениях параметра сигнала должны передаваться номера временных интервалов. Если затраты (в единицах пропускной способности) на служебную информацию существенно меньше выигрыша, получаемого благодаря сжатию информации, учитывать эти затраты не следует. С другой стороны, если эти затраты сопоставимы с выигрышем, не следует применять сжатие, как себя не оправдывающее в главном. Таким образом, вряд ли есть необходимость во введении характеристики, оценивающей затраты на служебную информацию.

Может возникнуть вопрос относительно учета искажений параметров сигнала, имеющих место в сжимателе из-за внешних и внутренних помех. Эти искажения неизбежны; однако учитывать их отдельно вряд ли есть необходимость, так как интегральный эффект на достаточно длинном отрезке пробного сигнала учитывается в цифрах точности Δt и Δs . В отдельных случаях, быть может, целесообразно оговаривать точности Δt и Δs при действии помех с фиксированными вероятностными характеристиками.

Отметим еще, что для снятия характеристик сжимателей отрезок пробного сигнала должен содержать по меньшей мере несколько периодов модулирующего колебания. Вообще говоря, длительность отрезка пробного сигнала нетрудно рассчитать по принятой точности характеристики.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ АСПЕКТЫ СЖАТИЯ ИНФОРМАЦИИ

В отличие от теории связи к проблеме сжатия измерительной информации вероятностный подход неприменим, так как сжатие подвергается детерминированные сигналы.

Учет вероятностных свойств измерительной информации тем не менее представляет большой интерес, так как позволяет обоснованно выбрать параметры Δt , Δs и τ_0 разрабатываемых сжимателей. Эти же свойства могут быть использованы для определения параметров пробных сигналов.

Можно, далее, ставить вопрос о «сжимателях случайных сигналов», т. е. о представлении сигнала набором чисел, характеризующих, например, числовые параметры законов распределения, корреляционных функций и т. п. Такие «сжиматели» не позволяют восстановить мгновенные значения сигналов; они давно и широко применяются и имеют свои установившиеся названия (коррелометры, анализаторы распределений и др.).

Следует также указать на неправомерность по отношению к измерительной информации отождествления сжатия с устранением избы-

точности (по кажущейся аналогии с сигналом связи). В измерительной информации нет избыточности в принятом смысле этого слова: одинаковость показаний измерительного прибора не является избыточностью. С другой стороны, освобождение от одинаковых показаний в процессе сжатия не приводит к понижению помехоустойчивости приема информации в дальнейшем. Этот последний довод приводится в связи с тем, что в теории связи уменьшение избыточности естественно связывается с понижением помехоустойчивости.

СЖАТИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЕЕ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ

До сих пор обсуждение проблемы сжатия измерительной информации велось по отношению к уже полученным результатам измерений данного прибора; операция сжатия преследовала цели экономии последующей передачи информации.

Возможна и другая постановка задачи, охватывающая сочетание функций измерительного прибора и устройства сжатия; другими словами, на выходе измерительного прибора должна появляться уже сжатая информация (вместе с метками времени). Такой подход к проблеме сжатия рассматривается, в частности, в работе [2]; в этом случае сжиматель выполнял роль устройства управления сбором информации.

В отдельных случаях подобная постановка приводит к агрегату, состоящему из уже известных измерительного прибора и сжимателя; этот подход не содержит принципиальной новизны.

Можно, однако, создание измерительного комплекса подчинить одновременно как интересам измерений, так и интересам экономизации измерений, т. е. сжатия. При этом возникают принципиально новые возможности. Подобный подход представляет значительный интерес по отношению к упомянутому выше диагностическому сжатию.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Заездный. О связи структурных свойств сигнала с его полосой частот.— Труды учебных институтов связи, 1966, № 28.
2. В. А. Виттих, А. Н. Гинзбург. Об одном алгоритме управления сбором информации.— Автометрия, 1965, № 4.

*Поступила в редакцию
6 июля 1967 г.*