

работки или графической подсистемы, что существенно (в 2 раза) сокращает время получения результатов эксперимента.

Цифровая информация записывается на НМЛ ИЗОТ-5003 в формате, принятом для ЕС ЭВМ, и может быть подвергнута вторичной обработке как на самой системе, так и в вычислительном центре.

Заключение. Опыт создания данной системы позволяет сделать следующие выводы:

1. Современное развитие микропроцессорной техники и аппаратуры КАМАК реализует компактные высокопроизводительные системы автоматизации с распределенным интеллектом, причем использование стандарта EUR-6500 дает возможность увеличить микроЭВМ до 8 шт. на крейт.

2. Емкость внешних запоминающих устройств на гибких магнитных дисках для работы с ЭВМ, оперативная память которых достигает 128 Кслов, недостаточна; и потому желательно применение НМД типа «Винчестер».

3. Использование данных систем предоставляет возможность перейти на качественно новый уровень выполнения экспериментов, проводимых в выездных условиях, за счет обеспечения экспресс-обработки данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухаров М. Н. и др. Системы автоматизации на базе микро-ЭВМ и аппаратуры КАМАК.— ПТЭ, 1980, № 2, с. 128.
2. Вуколик В. М. и др. Вопросы построения типовой системы автоматизации экспедиционных радиотехнических экспериментов.— В кн.: Тез. докл. VI-й Всесоюз. конф. по планированию и автоматизации экспериментов в научных исследованиях. М.: МЭИ, 1980, ч. 1, с. 78.
3. Выставкин А. Н., Олейников А. Я., Стрельников В. Н., Чернов Н. В. Вопросы разработки экспедиционных систем сбора данных на базе аппаратуры КАМАК, микропроцессора и цифрового магнитофона.— В кн.: Труды II-го Всесоюз. симпозиума по модульным информационно-вычислительным системам. М.: ОИЯИ, 1980, с. 175.
4. Вуколик В. М. и др. Система автоматизации экспедиционных радиофизических экспериментов.— ПТЭ, 1981, № 3, с. 256.
5. Вуколик В. М. и др. Обеспечение входных и выходных характеристик систем автоматизации экспериментов на основе малых электронных вычислительных машин и аппаратуры КАМАК.— ПТЭ, 1982, № 1, с. 7.
6. Multiple Controllers in a CAMAC Crate. EUR 6500e. ESONE Committee, 1978.
7. The Definition of IML. A Language for Use in CAMAC Systems. IML/M1 ESONE Committee, 1974, 36 p.
8. Subroutines for CAMAC. ESONE Committee, 1978. 36 p.

Поступило в редакцию 24 января 1984 г.

УДК 681.3(088.8)

Н. С. АНИШИН

(Краснодар)

ЦИФРОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ФУНКЦИЙ

При моделировании и экспериментальном исследовании информационно-вычислительных систем возникает необходимость применения цифровых генераторов детерминированных сигналов, представленных цифровыми отсчетами (например, синусоиды, экспоненты, параболы и т. п.). Поскольку их одновременно используемое количество при моделировании сложных объектов может быть большим, встает вопрос о создании простых генераторов с достаточно высокой точностью цифрового представления требуемой функции. Последнее требование — простота генератора — заставляет отказаться от использования ЦВМ или ЦДА для этих целей.

Ниже нами предлагается и обосновывается возможность использования цифровых интерполяторов, реализованных либо аппаратно (например, в виде интегральных микросхем), либо программно на микропроцессорах.

Цифровая интерполяция широко используется в системах числового программного управления станками, в графопостроителях и дисплеях для формирования прямо- и криволинейных траекторий [1]. Однако множество кривых, которые реализуются с помощью цифровых интерполяторов, весьма ограничено (прямая, окружность, парабола в окрестности своей вершины). Другие кривые, как правило, не реализуются, в том числе по причине отсутствия простых (например, без операций умножения и деления, которые трудно реализуемы, особенно аппаратно) алгоритмов цифровой интерполяции.

В основу предлагаемого универсального алгоритма цифровой интерполяции любой плоской кривой, заданной в явной, неявной или параметрической формах, положен оптимальный алгоритм цифровой линейной интерполяции (с использованием оценочной функции) [2], по которому в каждый текущий момент выбирается тип интерполяционного шага (координатный или диагональный). В качестве величин ΔX и ΔY , являющихся исходными для алгоритма линейной интерполяции, на каждом шаге выбираются ближайшие целые величины, пропорциональные координатным проекциям вектора скорости условной точки, двигающейся по кривой с постоянной скоростью и находящейся в данный момент вблизи текущего узла интерполяции.

Так, например, в случае явного задания функции, определяющей кривую $y = f(x)$, имеем

$$\Delta Y = \mu [k|f'(x)| + 1/2]_{\text{int}}; \quad \Delta X = \mu k. \quad (1)$$

Для случая неявного задания функции $F(x, y) = 0$

$$\Delta Y = \pm \mu \left[k \left| \frac{\partial F}{\partial x} \right| + \frac{1}{2} \right]_{\text{int}}; \quad \Delta X = \mp \mu \left[k \left| \frac{\partial F}{\partial y} \right| + \frac{1}{2} \right]_{\text{int}}. \quad (2)$$

И наконец, при параметрическом задании кривой (параметр t)

$$\Delta Y = \mu \left[k \left| \frac{df_y(t)}{dt} \right| + \frac{1}{2} \right]_{\text{int}}; \quad \Delta X = \mu \left[k \left| \frac{df_x(t)}{dt} \right| + \frac{1}{2} \right]_{\text{int}}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент, учитывающий направление обхода кривой $\mu \in \{-1, +1\}$; k — масштабирующий коэффициент, обеспечивающий наилучшее округление до целого (обычно $k = 2^n$, $n \in \mathbb{Z}$).

Так же как и в случае линейной интерполяции, вводится оценочная функция

$$\varepsilon_i = \begin{cases} |\Delta X| - 2|\Delta Y| & \text{при } |\Delta X| \geq |\Delta Y|; \\ 2|\Delta X| - |\Delta Y| & \text{при } |\Delta X| < |\Delta Y|. \end{cases} \quad (4)$$

Однако в новом алгоритме она корректируется на каждом шаге не только из-за изменения координат текущего узла интерполяции, но и из-за возможных изменений величин ΔX и/или ΔY в новом узле.

Тогда правила выбора типа очередного шага в универсальном алгоритме таковы:

- а) для случая $|\Delta X| \geq |\Delta Y|$:
 если $\varepsilon_i \geq 0$, то $x_{i+1} = x_i + \text{sign } \Delta X$, $y_{i+1} = y_i$,
 иначе $x_{i+1} = x_i + \text{sign } \Delta X$, $y_{i+1} = y_i + \text{sign } \Delta Y$;
 б) для случая $|\Delta X| < |\Delta Y|$:
 если $\varepsilon_i \geq 0$, то $x_{i+1} = x_i + \text{sign } \Delta X$, $y_{i+1} = y_i + \text{sign } \Delta Y$,
 иначе $x_{i+1} = x_i$, $y_{i+1} = y_i + \text{sign } \Delta Y$.

Корректировка оценочной функции выполняется по формулам, учитывающим изменение координат текущего узла и компонент ΔX , ΔY в новом ($i+1$)-м узле интерполяции:

- а) при $|\Delta X_c| \geq |\Delta Y_c|$ $\varepsilon_{i+1}^* = \varepsilon_i + |\Delta X_n| - 2|\Delta Y_n| - |\Delta X_c| \text{sign } \varepsilon_i$;
 б) при $|\Delta X_c| < |\Delta Y_c|$ $\varepsilon_{i+1}^* = \varepsilon_i + 2|\Delta X_n| - |\Delta Y_n| - |\Delta Y_c| \text{sign } \varepsilon_i$.

В любом случае

$$\varepsilon_{i+1}^* = \begin{cases} \varepsilon_{i+1}^* + (|\Delta X_n| + |\Delta Y_n|) & \text{при переходе от } |\Delta X_c| \geq |\Delta Y_c| \text{ к } |\Delta X_n| < |\Delta Y_n|; \\ \varepsilon_{i+1}^* - (|\Delta X_n| + |\Delta Y_n|) & \text{при переходе от } |\Delta X_c| < |\Delta Y_c| \text{ к } |\Delta X_n| \geq |\Delta Y_n|; \\ \varepsilon_{i+1}^* & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (6)$$

где ΔX_c , ΔY_c , ΔX_n , ΔY_n — старые и новые значения величин ΔX и ΔY , т. е. значения ΔX и ΔY в текущем (i -м) и очередном ($i+1$ -м) узлах интерполяции.

Предложенный алгоритм эффективен тогда, когда вычисление ΔX и ΔY возможно осуществить по более простым формулам (алгоритмам), чем вычисление $f(x)$. Иногда ΔX и ΔY легко определяются через координаты текущего узла интерполяции. Так, например, для экспоненты $f(x) = A(1 - e^{-x/B})$ имеем $\Delta X = B$, $\Delta Y = A - y$. Другой пример — гипербола $F(x, y) = xy - A = 0$. Для этого случая $\Delta X = \pm x$, $\Delta Y = \pm y$. (Знак зависит от номера квадранта и направления обхода кривой.)

В некоторых случаях величины ΔX и ΔY могут легко определяться через координаты текущего узла цифровой интерполяции специально подобранной кривой (например, дуга эллипса имеет ΔX и ΔY , которые равны координатам — абсциссе и ординате узлов интерполяции двух дуг окружностей с радиусами R и r соответственно, где R и r — полуоси эллипса).

Машинная реализация предлагаемого метода генерации цифровых отсчетов функции возможна как аппаратная (например, в виде БИС, дополненной узлом вычисления ΔX и ΔY), так и программная. В последнем случае наиболее целесообразно применение микропроцессоров, не содержащих (с целью снижения стоимости, по-

i	ϵ_i	D	F	x_i	y_i	$f(x_i) = 8,5 \times \ln\left(1 + \frac{x_i}{10}\right)$
0	-13	10	-32	0	0	0
1	-3	14	-32	1	1	0,81
2	11	18	-32	2	2	1,55
3	-21	22	-32	3	2	2,23
4	1	26	-32	4	3	2,86
5	-31	30	-32	5	3	3,45
6	-1	34	-32	6	4	4,00
7	33	38	-32	7	5	4,51
8	1	42	-32	8	5	5,00
9	-31	46	-32	9	5	5,46
10	15	50	-32	10	6	5,89

вышения быстродействия и упрощения технической реализации) команд умножения и деления (так как предложенный алгоритм не включает таких операций).

Касаясь точности интерполяции, а следовательно, и генерации цифровых отсчетов функции, заметим, что величины ΔX и ΔY , вычисляемые на каждом i -м шаге интерполяции, должны быть усреднены на интервале $[i\delta, (i+1)\delta]$ изменения координаты с большим приращением (здесь δ — шаг интерполяции по этой координате). В этом случае методическая погрешность интерполяции (генерации) равна половине шага интерполяции по данной координате — минимально возможной для цифровой интерполяции величине.

В остальных случаях, когда вместо средних значений ΔX и ΔY берутся значения этих величин в начале интервала (т. е. в i -м узле), максимальная методическая погрешность достигает величины одного шага интерполяции. В качестве частичной меры можно рекомендовать использование среднего арифметического двух значений в i -м и в $(i+1)$ -м узлах либо значение ΔX и ΔY в какой-то (например, срединной) промежуточной точке между соседними узлами интерполяции.

Рассмотрим пример построения алгоритма генерации функций. Пусть это требуется сделать для функции $y = A \ln(1 + x/B)$ ($x > 0, B > 0, A \leq B$), т. е. необходимо сгенерировать положительную часть графика логарифмической кривой. Допустим, что A и B — масштабирующие коэффициенты, учитывающие величины шагов интерполяции по осям y и x (величины этих шагов могут быть и одинаковыми). Тогда x принимает только целые значения, соответствующие номерам отсчетов функции.

Найдем ΔY и ΔX по формуле (1):

$$\Delta Y = kA/(B+x); \quad \Delta X = k. \quad (7)$$

Умножая правые части обоих равенств на $(B+x)$, чтобы избежать операции деления в (7), окончательно имеем (при $k = 2^n$)

$$\Delta Y = 2^n A; \quad \Delta X = 2^n (B+x),$$

где x — значение абсциссы текущего узла интерполяции, равное номеру отсчета. Таким образом, одна из компонент — константа, другая находится с помощью простого сложения. Для повышения точности генерации ΔX можно вычислять так:

$$\Delta X = 2^n (B + 1/2 + x).$$

Величина $n \in N$ выбирается такой, чтобы константы $2^n A$ и $2^n B$, округленные до целого, достаточно точно представляли A и B в масштабе 2^n .

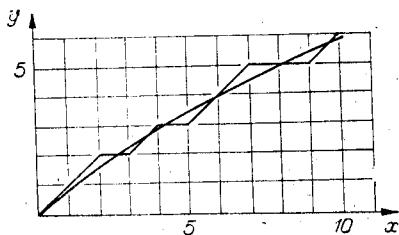


Рис. 1.

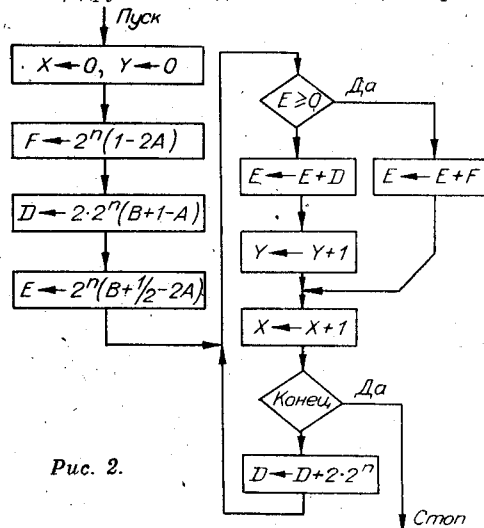


Рис. 2.

Конкретизируем A и B . Пусть $A = 8,5$, $B = 10,0$. Тогда $n = 1$, $\Delta Y = 17$, $\Delta X = 21 + 2\varepsilon$.

Результаты расчетов десяти первых шагов интерполяции по формулам (4) и (5) приведены в таблице.

На рис. 1 показан график функции $8,5 \ln(1 + x/10)$. Там же нанесены цифровые отсчеты, полученные цифровым генератором в дискретных точках x , равных целым значениям. Методическая погрешность не превышает половины шага (0,5) интерполяции. Такой результат получен за счет того, что было взято среднее значение $\Delta X = (\lfloor \Delta X_n \rfloor + \lfloor \Delta X_c \rfloor)/2$, равное $(B + x + 1/2)$. Уменьшая шаг интерполяции, можно добиться требуемой точности генерации.

На рис. 2 представлена возможная блок-схема алгоритма генерации логарифмической функции $A \ln(1 + x/B)$ ($x \geq 0$). Для обоснования структуры приведенного алгоритма преобразуем его математическую модель (5), конкретизированную для данной функции:

$$\begin{aligned} &\text{если } \varepsilon_i \geq 0, \text{ то } x_{i+1} = x_i + 1, \quad y_{i+1} = y_i, \\ &\text{иначе } x_{i+1} = x_i + 1, \quad y_{i+1} = y_i + 1; \\ \varepsilon_{i+1} &= \begin{cases} \varepsilon_i - 2^n(2A - 1), & \text{если } \varepsilon_i \geq 0; \\ \varepsilon_i + 2^n(2B + 2 - 2A) + i \cdot 2^n, & \varepsilon_i < 0, \end{cases} \end{aligned}$$

где $\varepsilon_0 = 2^n(B + 1/2 - 2A)$; $i + 1 = 1, 2, 3, \dots$ — номер шага (отсчета).

Аппаратная реализация алгоритма также весьма проста: основа его — накапливающий сумматор, в который предварительно заносится величина $E = 2^n(B + 1/2 - 2A)$. В зависимости от знакового разряда сумматора к нему добавляется либо содержимое счетчика с первоначальным значением $D = 2^n(2B + 2 - 2A)$, которое затем увеличивается на 2^{n+1} после каждого шага интерполяции, либо содержимое регистра, в котором хранится константа $F = -2^n(2A - 1)$. На каждом шаге наращивается значение счетчика аргумента (если нужна эта величина), и всякий раз при $\varepsilon_i \geq 0$, т. е. когда будет подсуммироваться константа F , возрастает содержимое счетчика значения функции.

В заключение отметим, что предложенный алгоритм и соответствующая ему методика проектирования генераторов функций весьма эффективны, особенно при их микропроцессорной реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способы подготовки программ и интерполяторы для контурных систем программного управления станками. — М.: Машгиз, 1970, с. 52—57.
2. Аннини Н. С., Тивков А. М. Оптимальный алгоритм цифровой линейной интерполяции. — Изв. вузов. Приборостроение, 1983, т. 26, № 8, с. 56—59.

Поступило в редакцию 12 мая 1984 г.

УДК 681.787.6

Н. Н. КАМЕНЕВ, Ю. В. ТРОИЦКИЙ

(Новосибирск)

ОТРАЖАЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ТОЛАНСКОГО С «НЕОБРАЩЕННЫМ» РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ В ПОЛОСАХ

Интерференционное исследование отражающих поверхностей методом Толанского сводится к наблюдению в отраженном свете полос равной толщины, которые обычно «обращены» по отношению к полосам в проходящем свете и представляют собой узкие темные линии на светлом фоне. Характеристики такой интерференционной картины очень чувствительны к поглощению в переднем зеркале интерферометра и к степени монохроматичности источника; оба эти фактора снижают контраст отраженных полос [1]. Новые возможности открываются при использовании интерферометра [2, 3], который в отраженном свете создает интерференционную картину, аналогичную наблюдаемой в проходящем свете, т. е. узкие светлые линии на темном фоне («необращенные» полосы). Эти возможности иллюстрируются в настоящем сообщении.

Интерферометр, использованный в работе, был образован двумя зеркалами. Переднее опорное зеркало изготовлялось по методике, предложенной в [4], и состо-