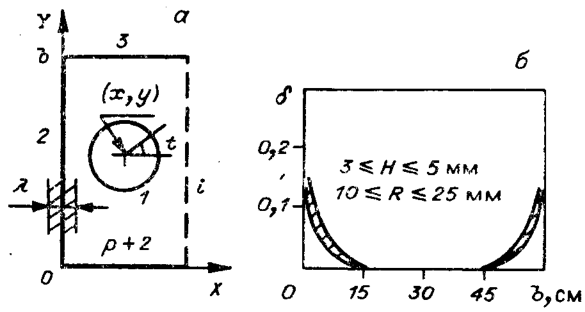
УДК 681.327.21

В. И. ЖУРАВЛЕВ, В. П. САВЕНКОВ

(Минск)

ПОГРЕШНОСТЬ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В УСТРОЙСТВАХ ГРАФИЧЕСКОГО ВВОДА

При синтезе индукционных устройств графического ввода (УГВ) с анализом амплитуд сигналов необходимо учитывать дестабилизирующее влияние краевых эффектов из-за конечности длин шин, наличия экранирующих элементов конструкции и электромагнитных наводок цепей коммутации планшета, если они не экранированы, в противном случае возникает систематическая погрешность считывания. Для компенсации погрешности необходимо знать ее распределение, что в общем виде сделать не удается. Ниже рассмотрены распределение указанной погрешности при некоторых допущениях и подходы, компенсирующие ее.



На рисунке, *а* показаны два параллельных взаимосвязанных контура УГВ: круговой *1*, представляющий весьма короткую [1] n-витковую катушку визира, и многоугольный, состоящий из координатной шины *2* длиной b и p участков цепи коммутации. Далее положим контуры линейными проводниками, окружающую среду однородной в магнитном отношении, а цепи коммутации шин эквивалентными [2]. С учетом последнего ограничимся рассмотрением взаимной индуктивности упомянутых контуров.

Полагая постоянной высоту между контурами и учитывая конструктивное исполнение катушки, взаимную индуктивность контуров выразим в виде функции координат центра катушки

$$M(x, y) \approx n \sum_{i=2}^{p+2} M_{1i}(x, y), \tag{1}$$

где $M_{1i}(x, y)$ — взаимная индуктивность центрального витка катушки с i-м участком многоугольного контура.

Используя результаты [1], правую часть полученного выражения можно представить как сумму определенных интегралов с подынтегральной рациональной функцией, содержащей множитель M_λ — взаимную индуктивность двух коаксиальных круговых контуров. Особенности вычисления M_λ затрудняют численное интегрирование суммы вследствие плохой работы алгоритма для некоторых взаимных положений контуров, когда приходится суммировать различные виды рядов, и ограниченной достоверности получаемых результатов ввиду невозможности оценки достигаемой точности.

Для получения алгоритма, свободного от указанных недостатков, воспользуемся параллельностью контуров. Тогда можно показать, что, например,

$$M_{12}(x, y) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \cos t \Big(\ln \big| b - R \sin t - y + \sqrt{H^2 + (R \cos t + x)^2 + (b - R \sin t - y)^2} \big| - \ln \big| -y - R \sin t + \sqrt{H^2 + (R \cos t + x)^2 + (b + R \sin t)^2} \big| \Big) dt, \tag{2}$$

где μ_0 — магнитная постоянная; R — радиус центрального витка катушки; t — переменная интегрирования; H — высота между многоугольным контуром и центральным витком. Выражения для $M_{1i}(x, y)$, где $i = 3, \ldots, p+2$, аналогичны. Вычисление полученных выражений реализуется подпрограммой численного интегрирования.

Оценим погрешности, упомянутые в начале, на примере косвенного измерения локальной координаты x.

В случае уединенной шины (1), принимая вид

$$M(x, y) \approx nM_{12}(x, y), \tag{3}$$

представляет нечетную функцию x, квазилинейную в локальной окрестности (на рисунке, *а* заштрихована) шины при фиксированном $y_0 \in [0, b]$. При реализации УГВ значения (3) в указанной окрестности обычно аппроксимируют линейным отрезком $m(x)$ для любого фиксированного y_0. Откуда

$$x = m(x)/k, \tag{4}$$

где k — угловой коэффициент упомянутого отрезка.

При косвенном измерении локальную координату x определяют согласно (4) по величине $m(x)$, полагая k неизменным [3]. В действительности изменение k вдоль шины вызывает систематическую погрешность, относительное значение которой

$$\delta = k_0/k - 1, \tag{5}$$

здесь k_0 — угловой коэффициент отрезка при измерении действительного значения x; k — текущее значение углового коэффициента отрезка.

На рисунке, *б* множество кривых иллюстрирует распределение (5) вдоль шины *2* (см. рисунок, *а*). В качестве k использовались значения частной производной $M'_x(0, y)$ из (3) во всем диапазоне изменений y, а в качестве k_0 — значение $M'_x(0, b/2)$. Вследствие этого (5) представляет четную функцию относительно середины шины, что, впрочем, вытекает из геометрических соображений, и претерпевает скачок значений на расстояниях, равных нескольким диаметрам контура *1* от концов шины.

Если участки цепи коммутации не экранированы, а УГВ использует упомянутый алгоритм косвенного измерения, систематическая погрешность представляет суперпозицию двух погрешностей, обусловленных: а) изменением k вдоль шины; б) влиянием взаимной индукции участков цепи коммутации, т. е. наличием в правой части (1) членов $nM_{1i}(x, y)$, $i = 3, \ldots, p+2$. На достаточно больших удалениях контура *1* от указанных участков их влиянием можно пренебречь, по-прежнему определяя x из (4); в остальных случаях это приводит к значительной потере точности.

Аналогичные эффекты вызывают экранирующие элементы конструкции планшета.

Рассмотрим пути уменьшения погрешностей с позиций достижения требуемой точности и реализуемости.

Первый, конструкторский, подход заключается в локализации действия краевого эффекта посредством размещения контура *1* внутри стакана из магнитного материала [4]. Подобная реализация усложняет конструкцию указателя и, что самое основное, не компенсирует полностью погрешность.

Второй подход предполагает выделение на поверхности планшета рабочей (центральной) зоны, внутри которой гарантированная точность достигается «сама собой» [3, 5]. Недостаток подхода — низкий коэффициент использования (0,8 и менее) поверхности планшета при его высокой доле стоимости в составе УГВ.

Третий, «табличный», подход, являющийся разновидностью алгоритмического, основывается на прибавлении поправок, хранимых таблично в ПЗУ или ПЛМ, к «грубо» измеренным координатам. Он обеспечивает малую погрешность в условиях, которые трудно реализовать на практике: стабильность высоты между контурами, отсутствие дрейфов и др.

И наконец, алгоритмический подход предусматривает компенсацию погрешностей, порождаемых изменением k по длине координатной шины, за счет отслеживания наклона $m(x)$ [6]. С этой целью в измерительную цепь УГВ вводится операция автоматической калибровки линейной шкалы, или, иначе, k, в виде отношения $\Delta M/\lambda = k$, где ΔM — диапазон изменения (1) в пределах шага квантования λ, с последующим определением x согласно (4). Достоинство подхода — в тождественности нулю (5), т. е. в учете причин, изменяющих k. Ими могут быть уже упоминавшиеся изменения высоты между контурами, дрейф напряжения источника электропитания, изменяющий значения ЭДС в контуре *1* и, следовательно, k.

Тем не менее рассмотренный метод «не работает» на краях планшета, поскольку не учитывает влияния цепей коммутации, порождающего нечетность (1). В равной степени он также не учитывает влияния экранов и экранирующих элементов конструкции при использовании их в планшете. Очевидно, что для учета этого влияния необходимы более сложный алгоритм измерения и, следовательно, большие накладные расходы аппаратуры и времени. Возможности технологии БИС сводят на нет указанные затраты, чему способствует несколько основных причин.

1. Высокая степень интеграции БИС допускает создание на кристалле функционально-законченной системы, реализующей алгоритм измерения локальных координат на основе сложных функций, в том числе описывающих с большой детализацией электромагнитные поля в УГВ.

2. Расчеты электромагнитных полей характеризуются многократными вычислениями на одну операцию ввода-вывода, что хорошо согласуется с принципом локальности вычислений в БИС в условиях ограниченности контактной ширины кристалла.

3. Помимо локальности вычислений, повышению быстродействия способствует

1. **Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчет индуктивностей: Справочная книга.— Л.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Ерофеева О. В., Савенков В. П.** Улучшение метрологических характеристик устройств графического ввода // Автометрия.— 1985.— № 2.
3. **А. с. 739575 СССР.** Устройство для считывания графической информации/В. А. Аканович, Г. И. Алексеев, Б. Я. Жевелев и др.— Опубл. 5.06.80. Бюл. № 21.
4. **Алексеев Г. И.** Электромагнитные планшетные устройства ввода/Под ред. П. М. Чеголина.— Минск: Наука и техника, 1985.
5. **Ермаков С. Л., Жевелев Б. Я., Рудой В. А.** Указатель типа «карандаш» в координатно-измерительных средствах повышенной точности // Автометрия.— 1985.— № 3.
6. **Чеголин П. М., Леонович Э. Н., Савенков В. П.** Автоматизация преобразования сложных форм графической информации.— Минск: Наука и техника, 1973.

Поступило в редакцию 22 декабря 1987 г.

УДК 681.3.06 : 519.17

Е. М. ХЕЙФЕЦ

(Рига)

АЛГОРИТМ РАСКРАСКИ ГРАФА С САМООБУЧЕНИЕМ

Разнообразные проблемы, встречающиеся при составлении расписаний, распределении ресурсов, проектировании печатных плат, в программировании и т. д., могут быть сведены к задаче раскраски вершин конечного неориентированного графа в минимальное число цветов. Эта задача является NP-полной, поэтому усилия многих исследователей направлены на конструирование достаточно эффективных методов приближенного ее решения.

В основе большинства подобных методов лежит так называемый последовательный алгоритм, суть которого заключается в следующем. Пусть элементы множеств вершин графа $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ и разрешенных для присвоения цветов $C = \{c_1, c_2, \ldots, c_m, \ldots\}$ пронумерованы. Последовательный алгоритм включает следующие действия:

а) вершине v_1 присваивается цвет с первым номером c_1;

б) каждой последующей вершине v_i, $i = 2, 3, \ldots, n$, присваивается цвет c_j с наименьшим номером, не встречающимся на смежных с v_i вершинах. Будем называть глобально оптимальным решением задачи раскраски такое присвоение $A : V \to C$, для которого $\mathrm{card}\,(V/A) = \chi$, где χ — хроматическое число графа. Если вершины графа правильно пронумеровать, то с помощью последовательного алгоритма можно найти глобально оптимальное решение. Однако алгоритм правильной нумерации неизвестен.

Описанные в литературе приближенные методы решения задачи раскраски отличаются друг от друга в основном способами упорядочения вершин графа [1]. Основная идея упорядочения состоит в том, чтобы поместить в начало перечня те вершины, которым на заключительной стадии работы последовательного алгоритма могут понадобиться цвета с большими номерами. Такие вершины будем называть трудными для присвоения. В качестве степени трудности присвоения принято использовать степени вершин $\delta(v_i)$ раскрашиваемого графа, степени вершин определенным образом выделяемых подграфов, число различных цветов на смежных с v_i вершинах в частично раскрашенном графе и т. п. Применяются и другие способы упорядочения, однако все они в общем случае не обеспечивают раскраску графа в минимальное число цветов χ.

В [2] для решения одной комбинаторной задачи распределения ограниченного ресурса между объектами также используется последовательный алгоритм, при этом по результатам каждого этапа его применения объекты, которым не удалось выделить ресурс, перемещаются в начало списка. Воспользуемся этой идеей для решения задачи раскраски графа. Для этого положим степени трудности присвоения d_i (будем называть их весами) каждой вершины v_i одинаковыми, произвольно упорядочим вершины и, применив последовательный алгоритм, найдем допустимую раскраску. Пусть при этом использовано q_k цветов. Увеличим веса d_i всех тех вершин, которым присвоен цвет с максимальным номером q_k, на случайную величину