УДК 004.05+004.415.5

В.Л. ПЕТРИК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ЦЕЛОЧИСЛЕННОЕ СЕМАНТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ

Показаны проблемы контроля функциональности программного обеспечения, основанного на оценке семантической корректности программного обеспечения информационно-управляющих систем, обусловленные значительной ресурсоемкостью как при использовании семантического векторов, так и семантических дескрипторов для представления данных о физической размерности. Предложен метод эффективного представления семантической информации, основанный на использовании целочисленного отображения семантического пространства в упорядоченное множество целочисленных семантических дескрипторов. Исследованы свойства целочисленных семантических дескрипторов. Показана возможность использования целочисленных семантических дескрипторов для оценки семантической корректности программного обеспечения. Определена аксиоматика целочисленной дескрипторной алгебры, использование которой позволяет снизить вычислительные ресурсы, необходимые для формального доказательства семантической корректности программного обеспечения информационно-управляющих систем.

целочисленное семантическое отображение, целочисленный семантический дескриптор, целочисленное дескрипторное семантическое пространство, целочисленная дескрипторная алгебра

Введение

Современные информационно-управляющие системы (ИУС) характеризуются интенсивным использованием программно-реализованных функций, к числу которых относятся и критически важные. Сложность процессов, которыми управляют ИУС, порождает высокую сложность программного обеспечения (ПО), что требует применения специальных многоэтапных методов контроля обеспечения функциональности. Важную роль играют независимая верификация при экспертизе ПО сертификационными центрами и контроль достоверности управляющих процессов при эксплуатации ИУС. Значительные объемы и сложность ПО, а также ограниченность ресурсов требуют применения формальных методов для контроля ПО, используемого в авиакосмической отрасли и атомной энергетике.

Постановка задачи. Известен метод повышения надежности ПО, основанный на корректности программно-реализованной функциональности ИУС посредством контроля преобразований размерностей [1, 2], позволяющий идентифицировать значительную часть программных дефектов определенных классов. Существенный недостаток метода – ресурсоемкость. Это проявляется как в подготовке ПО для экспертизы, требующей указания программным переменным их физических размерностей – семантик, так и в сложности реализации контроля функциональности в реальном времени, характеризующимся ограниченными ресурсами ИУС. Главная причина ресурсоемкости – представление семантической информации в виде семантических векторов (СВ), что приводит к многократному увеличению объема исходных данных и операций, обеспечивающих контроль функциональности ПО ИУС. Использование сжимающего семантического отображения (ССО) [3], эффективно представляющего всю семантическую информацию в виде одного вещественного числа – семантического дескриптора (СД) позволяет снизить объем дополнительной оперативной памяти, однако требует использования операций с плавающей точкой.

Дальнейшее снижение ресурсоемкости заключается в разработке и использовании представления семантической информации, основанного на целых числах, что потребует доказательства существования целочисленного семантического отображения (ЦСО) [4, 5], исследования его свойств, а также свойств самих объектов – носителей семантической информации и определения алгебраических операций над ними. Рассмотрению перечисленных выше вопросов и посвящена данная работа.

1. Целочисленное семантическое отображение

Докажем возможность построения ЦСО n-мерного семантического пространства (СП) на упорядоченное множество скалярных целых числовых элементов, называемых целочисленными семантическими дескрипторами (ЦСД):

$$I:S\rightarrow C, \tag{1}$$

где I – ЦСО, S – СП, $C=\{C_i\}$ – упорядоченное множество ЦСД.

Пусть СП есть $X_1 \times X_2 \times ... \times X_n = Q$, где $X_1, X_2, ..., X_n$ – множества значений основных единиц выбранной системы единиц (СЕ) [6], тогда искомое отображение $I:\{X_1 \mathrm{x} X_2 \mathrm{x} \ldots \mathrm{x} X_n\}\rightarrow\{C_i\}$, биективно, т.е. сюръективно и инъективно. Взаимооднозначность отображения I множества $\{Q_i\}$ во множество $\{C_i\}$, проявляющаяся в сопоставлении каждому элементу $x\in Q$ элемента $I(x)\in C$ – ЦСД – значения отображения I на элементе x, требует эквивалентности множеств Q и C.

Отображение I – сюръекция, т.к. $I(Q)=C$. Искомое отображение I – инъекция, т.к. $\forall\ x_1\neq x_2$ и $x_1, x_2\in Q$ $\exists\ c_1=I(x_1)$, $c_2=I(x_2)$, $c_1\neq c_2$. Отображение I множества Q в C однозначно определяется множеством $\{(x, I(x)\rangle\in Q\mathrm{x}C\ |x\in Q\}$ $I:Q\rightarrow C$.

Необходимо обеспечить взаимнооднозначность соответствия элементов Q и C. Для этого множества Q и C должны быть эквивалентными. Множество элементов Q счетно, т.к. его элементы биективно сопоставимы с натуральными числами, т.е. элементы Q можно занумеровать. Множество C также счетно. Два конечных множества эквивалентны тогда и только тогда, когда число их элементов одинаково.

Множество ЦСД C – частично упорядоченное множество. Пусть φ – некоторое бинарное отношение во множестве C, определяемое некоторым множеством $R_\varphi \subset C\times C$. Отношение φ является частичной упорядоченностью, т.к. оно удовлетворяет условиям:

1) рефлексивности: $a\varphi a$;
2) транзитивности: если $a\varphi b$, $b\varphi c$, то $a\varphi c$;
3) антисимметричности: если $a\varphi b$ и $b\varphi a$, то $a = b$.

Запись $c_1 \le c_2$ означает, что пара $(c_1,c_2)\in R_\varphi$, при этом c_1 не превосходит c_2 или c_1 подчинен c_2.

Отображение I сохраняет порядок. Пусть Q и C два частично упорядоченных множества. Отображение I сохраняет порядок, т.к. из $a \le b$, где $a, b\in Q$ следует, что $I(a) \le I(b)$ в C.

Отображение I – изоморфизм частично упорядоченных множеств Q и C, т.к. оно биективно, а условие $I(a) \le I(b)$ выполняется только при $a \le b$. Таким образом, множества Q и C являются изоморфными между собой. Отношение изоморфизма I между частично упорядоченными множествами является отношением эквивалентности.

Для ЦСО I необходимо существование такого числа $\alpha < 1$, что для любых двух элементов $x,y\in Q$ верно $\rho(Ax,Ay) \le \alpha\rho(x,y)$.

Рассмотрим отображение I, задаваемое как:

$$c = \sum_{j=1}^{n} a_j x_j + b\,, \tag{2}$$

где n – количество основных единиц СЕ;

c – искомое значение СД;

a_j – коэффициенты отображения;

x_j – степени основных единиц СЕ;

b – коэффициент сдвига отображения.

Для евклидового пространства метрика:

$$\rho(x,y)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}\ .$$

Исходя из неравенства Коши-Буняковского:

$$\rho^2(y',y'')=\left(\sum_j a_j(x'_j-x''_j)\right)^2\le\left(\sum_j a_j^2\right)\rho\ .$$

Отсюда условие существования отображения

$$\sum_j a_j^2\le\alpha\le 1\ . \qquad (3)$$

Найдем параметры отображения в виде (2).

Предположим, что существуют границы минимального и максимального по модулю значения j-й координаты СВ, соответствующей одной из основных единиц выбранной системы, соответственно $\left[L_{\min j},L_{\max j}\right]$. Тогда координаты элементов, принадлежащих ограниченной области СП, могут быть определены как:

$$x_j\in[-L_{\max j};\,-L_{\min j}]\cup 0\cup[L_{\min j};L_{\max j}]\ . \qquad (4)$$

Исходя из того, что значение СД для безразмерной переменной равно нулю, имеем b=0. Далее будем искать отображение в виде:

$$c=\sum_{j=1}^{n}a_jx_j\ . \qquad (5)$$

Необходимое условие (НУ) изоморфизма отображения для положительных x:

$$\forall j=\overline{1,n}\ \ a_j\cdot L_{\min j}>\sum_{i=j+1}^{n}a_i\cdot L_{\max i}\ . \qquad (6)$$

В случае, если x принимает как положительные, так и отрицательные значения, необходимо выполнение более сильного НУ изоморфизма:

$$\forall j=\overline{1,n}\ \ a_j\cdot L_{\min j+1}>\sum_{i=j+2}^{n}a_i\cdot L_{\max i}\ . \qquad (7)$$

Полагаем, что $\sum_j a_j^2\le 1$ и $\forall j=\overline{1,n}\ \ a_j>0$.

Для приведения значений СД к целому типу умножим значение СД на некоторую целую константу K, значение которой зависит от количества основных единиц для выбранной СЕ.

$$c=K\sum_{j=1}^{n}a_jx_j\ . \qquad (8)$$

Выражение (8) можно представить в виде (9):

$$c=\sum_{j=1}^{n}f_jx_j\ , \qquad (9)$$

где f_j – коэффициенты ЦСО.

2. Свойства целочисленного дескрипторного семантического пространства

Множество ЦСД C обладает метрикой, определяющей расстояние $\rho(x,y)$ между любыми элементами x и y из C в соответствии с аксиомами:

1) $\rho(x,y)=0$, если $x=y$;
2) $\rho(x,y)=\rho(y,x)$; (10)
3) $\rho(x,z)\le\rho(x,y)+\rho(y,z)$.

Множество ЦСД C является метрическим пространством, которое далее будем называть целочисленным дескрипторным семантическим пространством (ЦДСП).

ЦДСП C является линейным (векторным), т.к. оно удовлетворяет следующим условиям:

I. Для любых двух ЦСД c_i, $c_j\in C$ однозначно определен третий элемент – ЦСД $c_k\in C$, соответствующий их сумме, обозначаемой c_i+c_j, причем выполняются законы:

1) $c_i+c_j=c_j+c_i$ (коммутативность сложения ЦСД);
2) $c_i+(c_j+c_к)=(c_i+c_j)+c_к$ (ассоциативность сложения ЦСД);
3) в C существует нулевой ЦСД c_0, соответствующий безразмерной единице, такой что $c_i+c_0=c_i$ для всех $c_i\in C$;
4) для каждого ЦСД $c_i\in C$ существует противоположный ЦСД $(-c_i)$, такой, что $c_i+(-c_i)=0$.

II. Для любого целого числа α и любого ЦСД $c_i\in C$ определен ЦСД $\alpha c_i\in c$, причем:

1) $\alpha(\beta c_i)=(\alpha\beta)c_i$;

2) $1c_i = c_i$; (11)

3) $(\alpha + \beta)c_i = \alpha c_i + \beta c_i$;

4) $\alpha(c_i + c_j) = \alpha c_i + \alpha c_j$.

ЦДСП C является алгеброй, т.к. в нем определена алгебраическая операция умножения ЦСД с аксиомами:

1) $(c_i c_j)\, c_к = c_i\,(c_j c_к)$; (12)

2) $c_i\,(c_j + c_к) = c_i\, c_j + c_i\, c_к$; $(c_j + c_к)\, c_i = c_j c_i + c_к c_i$;

3) $\alpha\,(c_i c_j) = (\alpha c_i)\, c_j = c_i\,(\alpha c_j)$.

Так как операция умножения коммутативна, т.е. выполняется аксиома: $c_i c_j = c_j c_i$, то дескрипторная алгебра (алгебра ЦДСП) является коммутативной алгеброй.

ЦДСП C является нормированным, т.к. в нем определена норма p, удовлетворяющая условиям:

1) $p(c_i) = 0$ только если $c_i = c_0$, где c_0 – нулевой ЦСД.

Роль нулевого ЦСД в ЦДСП С играет элемент, имеющий координату 0;

2) $p(\alpha c_i) = |\alpha| p(c_i)$ для всех α, где α целое число;

3) $p(c_i) \geq 0$ при $c_i \neq c_0$; (13)

4) $p(c_i + c_j) \leq p(c_i) + p(c_j)$, $c_i, c_j \in C$.

ЦДСП является нормированным и метрическим, т.к. $\rho(c_i, c_j) = \| c_i - c_j \|$.

Целочисленное дескрипторное семантическое нормированное пространство C является нормированной алгеброй, т.к. в нем выполняются две аксиомы:

1) $\|e\| = 1$;

2) $\| c_i c_j \| \leq \|c_i\|\, \|c_j\|$. (14)

3. Целочисленная дескрипторная алгебра

Линейность ЦДСП позволяет контролировать семантическую корректность ПО ИУС благодаря свойствам операций, приведенным в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения: L, R – левый и правый операнды, $I(L)$, $I(R)$ – их ЦСД.

Значение целочисленного семантического дескриптора результата корректного выполнения операций сложения, вычитания, сравнения, присваивания совпадает со значением ЦСД любого из операндов. Несовпадение значений ЦСД операндов перечисленных операций свидетельствует о некорректности операций и, соответственно либо о программном дефекте, либо об аппаратном сбое. При выполнении операций умножения условие корректности не проверяется, а ЦСД результата определяется как сумма ЦСД множителей. При выполнении операции деления условие корректности также не проверяется, однако ЦСД результата является разностью значений ЦСД делимого и делителя. При возведении в степень условием корректности является нулевое значение ЦСД правого операнда – безразмерность показателя степени. ЦСД результата корректного возведения в степень определяется как произведение ЦСД основания на показатель степени.

Таблица 1

Аксиоматика
целочисленной дескрипторной алгебры

№	Операция	Обозначение	Условие корректности	Дескриптор результата
1	Сложение	$L+R$	$I(L)=I(R)$	$I(L)$
2	Вычитание	$L–R$	$I(L)=I(R)$	$I(L)$
3	Умножение	$L \cdot R$	Отсутствует	$I(L)+I(R)$
4	Деление	L/R	Отсутствует	$I(L)–I(R)$
5	Возведение в степень	L^R	$I(R)=0$	$I(L)*R$
6	Сравнение	$L>R$, $L<R$, $L=R$	$I(L)=I(R)$	Отсутствует
7	Присваивание	$L=R$	$I(L)=I(R)$	$I(L)$

Использование ЦСД позволяет доказывать семантическую корректность ПО ИУС посредством решения только одной алгебраической системы линейных уравнений, построенной на основе аксиоматики алгебры ЦСД.

4. Свойства целочисленных семантических дескрипторов

Реализация ЦСО в условиях ограниченных ресурсов требует ограничения мощности множества элементов СП. Анализ физических размерностей для системы СИ, которая обеспечивает наибольшую достоверность экспертизы [6], показал, что значения модулей степеней основных единиц заключены в диапазоне от 1 до 7.

Согласно [7] примем следующий порядок основных единиц: длина; масса; время; сила электрического тока; термодинамическая температура; сила света; количество вещества; плоский угол; телесный угол.

На основании НУ изоморфизма, выбранного порядка и диапазонов модулей степеней основных единиц, определим значения коэффициентов отображения f_j.

Значения искомых коэффициентов будем искать в двоичной форме. Коэффициенты ЦСО, а также характеристики разрядов ЦСД, представлены в табл. 2, при построении которой подразумевалось что максимальное значение степеней каждой из основных единиц ограничено семью, что обусловило выделение трех двоичных разрядов.

Согласно принятым допущениям «длина», измеряемая в [м], представляется единицей в нулевом разряде ЦСД, остальные разряды имеют нулевые значения. «Площадь», измеряемая в [м^2], имеет единицу в первом разряде, остальные разряды – нулевые. «Объем», измеряемый в [м^3], имеет единицу только в нулевом и первом разрядах ЦСД единицу. Аналогично представляются размерности остальных физических единиц {время}, {масса} и т.п. В последней колонке табл. 2 приведены коэффициенты ЦСО, значения которых совпадают с минимальным порядком разряда соответствующей основной единицы, который содержится в предпоследней колонке. Значение ЦСД определяются суммой произведений степеней порядков разрядов на соответствующие коэффициенты f_j ЦСО. Введение «разделительных» разрядов обусловлено необходимостью обеспечения изоморфизма ЦСО как для положительных, так и для отрицательных степеней размерностей основных единиц.

Таблица 2

Коэффициенты ЦСО

№ Разряда	Основная единица	Степень основной единицы		Вес Разряда	Коэффициенты ЦСО f_j
		x_j	Размерность		
0	Длина [м]	1	м^1	1	1
1		2	м^2	2	
2		4	м^4	4	
3	Разделительный			8	
4	Масса [кг]	1	кг^1	16	16
5		2	кг^2	32	
6		4	Кг^4	64	
7	Разделительный			128	
8	Время [сек]	1	сек^1	256	256
9		2	сек^2	512	
10		4	сек^4	1024	
11	Разделительный			2048	
12	Сила электрического тока [A]	1	a^1	4096	4096
13		2	a^2	8192	
14		4	a^4	16384	
…					
	Знаковый разряд			1	

Предложенная структура ЦСД позволяет находить ЦСД функций по ЦСД их аргументов. При этом ЦСД частного определяется как разность ЦСД делимого и делителя, а ЦСД произведения – как сумма ЦСД сомножителей. ЦСД функции возведения в целую степень определяется как произведение ЦСД аргумента на константу – показатель степени.

Использование ЦСД для контроля функциональности ПО ИУС возможно в двух вариантах. Первый предусматривает непосредственную интерпретацию операций посредством переопределения программных типов данных или статического анализа программного кода. Второй заключается в генерации в процессе статического анализа программного кода системы линейных алгебраических уравнений и последующем доказательстве ее совместности. В каждом из вариантов применение ЦСД обеспечивает следующие преимущества по сравнению с СВ:

– уменьшение дополнительных объемов ОЗУ, необходимых для хранения семантической информации. Так использование СВ для системы СИ требует применения упорядоченного множества из девяти чисел. Применение ССО требует использования только одного числа с плавающей запятой. Применение ЦСО и ЦСД позволяет ограничиться только одним целым числом;

– уменьшение количества дополнительных операций для проверки условия семантической корректности и вычисления ЦСД результата. При использовании СВ требуется производить целочисленные операции над девятью координатами. Использование ССО требует одной операции над числами с плавающей запятой, а применение ЦССО и ЦСД – одной целочисленной операции;

– применение ЦСД для алгебраического контроля семантической корректности ПО, основывающегося на решении системы линейных алгебраических уравнений (или доказательстве их непротиворечивости), построенных на основе условий семантической корректности целочисленной дескрипторной алгебры, требует решения одной системы уравнений, а использование СВ для системы СИ – доказательства непротиворечивости девяти систем уравнений. Причем корни должны быть целыми, что является еще одним дополнительным условием корректности ПО.

5. Достигаемая эффективность

Применение ЦСО и ЦСД снижает дополнительные ресурсные потребности для экспертизы ПО ИУС примерно в 10 раз по сравнению с методами, использующими СВ, и по сравнению с методами, основанными на использовании ССО, повышает достоверность семантического контроля с одновременным снижением необходимых ресурсов.

Более точно дополнительные ресурсные затраты можно определить на основе операционного спектра [1] – процентного состава операций. Для ПО ИУС большинство операций являются либо аддитивными (сложение, вычитание, присваивание, сравнение), либо мультипликативными (умножение, деление). Тогда общее время выполнения программы без дескрипторного семантического контроля (ДСК)

$$T_{\overline{ДСК}} = N_A T_A + N_M T_M , \qquad (15)$$

где N_A, N_M – количество аддитивных и мультипликативных операций;

T_A, T_M – время выполнения аддитивных и мультипликативных операций.

Выполнение ДСК аддитивных операций требует дополнительного контроля ЦСД (сравнения их значений). Тогда общее время выполнения аддитивных операций:

$$T_{АДСК} = N_A (T_A + T_{CP}) ,$$

где T_{CP} – время сравнения значений ЦСД, необходимое для контроля семантической корректности аддитивной операции.

Так как ЦСД представлен целым числом, а операция сравнения принадлежит к аддитивным операциям, то $T_{ср} = T_A$. Отсюда $T_{АДСК} = 2N_A T_A$.

Реализация ДСК мультипликативных операций требует дополнительно сложения/вычитания ЦСД и присваивания. Отсюда

$$T_{МДСК} = N_M (T_M + T_{СЛ} + T_{ПР}) ,$$

где $T_{МДСК}$ – общее время выполнения мультипликативных операций;

$T_{СЛ}, T_{ПР}$ – время сложения (вычитания) и присваивания ЦСД.

Или $T_{МДСК} = N_M (T_M + 2T_A)$.

Таким образом, общее время выполнения программы

$$T_{ДСК} = T_{АДСК} + T_{МДСК} = 2N_A T_A + N_M (T_M + 2T_A) .$$

Или $T_{ДСК} = T_{\overline{ДСК}} + N_A T_A + 2N_M T_A$.

Определим коэффициент замедления вычислительного процесса как отношение времени выполнения программы с ДСК ко времени выполнения в обычном режиме $K_{ДСК} = \dfrac{T_{ДСК}}{T_{\overline{ДСК}}}$.

Тогда $K = 1 + \dfrac{N_A T_A + 2N_M T_A}{N_A T_A + N_M T_M}$.

Т.к. $N_A + N_M \approx N_\Sigma$, то

$$K = 1 + \frac{N_\Sigma + N_M}{N_A + N_M (T_M / T_A)} ,$$

или

$$K = 1 + \frac{1 + N_M / N_\Sigma}{1 + \frac{N_M}{N_\Sigma}\left(\frac{T_M}{T_A} - 1\right)} .$$

Обозначим дополнительное замедление:

$$\delta K_{ДСК} = \frac{1 + N_M / N_\Sigma}{1 + \frac{N_M}{N_\Sigma}\left(\frac{T_M}{T_A} - 1\right)} .$$

Найдем аналогичные характеристики векторного семантического контроля (ВСК). Выполнение аддитивной операция требует дополнительного контроля n координат векторов (сравнения их значений), а мультипликативных – дополнительно n сложений/вычитаний и n присваиваний. Обозначим общее время выполнения программы без ВСК

$$T_{\overline{ВСК}} = N_A T_A + N_M T_M .$$

Время выполнения при ВСК аддитивных операций $T_{АВСК} = N_A(T_A + nT_{СР})$, а мультипликативных $T_{МВСК} = N_M(T_M + n(T_{СЛ} + T_{ПР}))$.

Тогда $T_{ВСК} = T_{АВСК} + T_{МВСК} =$

$= N_A T_A + N_M T_M + n(N_A T_A + 2N_M T_A)$.

Коэффициент замедления в условиях ВСК, определяемый как отношение времени выполнения задачи в условиях ВСК ко времени выполнения задачи без него $K_{ВСК} = \frac{T_{ВСК}}{T_{\overline{ВСК}}}$. Тогда

$$K_{ВСК} = 1 + \frac{n(N_A T_A + 2N_M T_A)}{N_A T_A + N_M T_M}$$

или $$K = 1 + n\frac{N_A + 2N_M}{N_A + N_M(T_M / T_A)} .$$

Принимая, что $\frac{N_A}{N_\Sigma} + \frac{N_M}{N_\Sigma} = 1$, получим

$$K_{ВСК} = 1 + n\frac{1 + N_M / N_\Sigma}{1 + \frac{N_M}{N_\Sigma}\left(\frac{T_M}{T_A} - 1\right)} .$$

Обозначим дополнительное замедление:

$$\delta K_{ВСК} = n\frac{1 + N_M / N_\Sigma}{1 + \frac{N_M}{N_\Sigma}\left(\frac{T_M}{T_A} - 1\right)} .$$

Оценим эффективность ДСК L как отношение дополнительных замедлений

$$L = \frac{\delta K_{ВСК}}{\delta K_{ДСК}} = n , \qquad (16)$$

где n – количество основных единиц выбранной СЕ.

Таким образом, дополнительный объем операций, необходимый для реализации семантического контроля функциональности ПО ИУС с использованием векторного представления данных о физической размерности в n раз больше, чем при использовании ЦСД.

6. Алгоритмическая реализация целочисленного семантического отображения

ЦСО позволяет для представления семантической информации использовать упорядоченные множества чисел, которые являются суммами, вычисляемыми в соответствии с (9) и табл. 2. При этом степени «м» соответствует целое двоичное число, лежащее в диапазоне [$-Lim_1$, Lim_1], т.е. [–7, 7], степени «кг» [$-Lim_2$, Lim_2], или [–112, 112] и т.д. Дискретность представления степеней основных единиц определяется значением $Kmin_i$, которая для «длины» равна 1, для «массы» 16, для «времени» 256. Соответственно для каждой из основных единиц $Kmax_1$=4, $Kmax_2$=64 и т.д.

Максимальные значения степеней основных единиц определяется величиной $UnitPower_1$=7, $UnitPower_2$=112 и т.д.

Для эффективной реализации ЦСО понадобится знания для каждой основной единицы абсолютного значения максимальной степени *maxPower*, которая для «длины» составляет 7, для «массы» – 112, для «времени» – 1792 и т.д.

Таким образом, функция ЦСО представляется формулой:

$$C = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot K\min_i , \qquad (15)$$

где x_i – компоненты СВ;

$Kmin_i$ – дискретность представления степени i-й основной единицы в ЦСД;

n – количество основных единиц СЕ;

C – целочисленный семантический дескриптор.

Алгоритмическая реализация ЦСО требует отдельного рассмотрения реализаций прямой и обратной задач: формирования ЦСД на основе СВ; восстановления СВ на основе значения ЦСД.

Алгоритмическая реализация формирования ЦСД в соответствии с (15) будет представлять собой просто взвешенное суммирование степеней основных единиц.

Восстановление СВ результата вычислений (декодирование) сводится к решению задачи, включающей одно уравнение и n ограничений:

$$D = x_1 K_{\min_1} + x_2 K_{\min_2} + ... + x_n K_{\min_n},$$
$$|x_1| < unitPower_1,$$
$$|x_2| < unitPower_2,$$
$$...$$
$$|x_n| < unitPower_n.$$

Трудоемкость решения такой задачи $O(n^3)$, где n – количество основных единиц. Ввиду того, что современные ИУС оперируют тысячами программных переменных использование такого подхода приведет к значительным затратам.

Предлагается метод восстановления координат СВ $\{x_i\}$ на основе значения ЦСД, имеющий трудоемкость $O(n)$.

В основе метода лежит поочередное сравнение текущего значения ЦСД с весом разряда, соответствующего степени основной величины. При этом степень основной величины поочередно принимает значения $maxPower_i$…–$maxPower_i$ с шагом $Kmin_i$. Каждый раз вычисляется разность между текущим значением степени основной величины и значением ЦСД. В случае, если эта разность меньше предела степени предыдущей величины Lim_{i-1}, то из значения ЦСД вычитается значение порядка текущего разряда, а значение текущей координаты x_i присваивается текущему значению степени основной величины $j2$, которое принимает значения $unitPower_i$ …-$unitPower_i$ с шагом –1. По завершении анализа для всех основных единиц в $\{x_i\}$ хранится восстановленное значение размерности. Алгоритм, реализующий метод, показан на рис. 1.

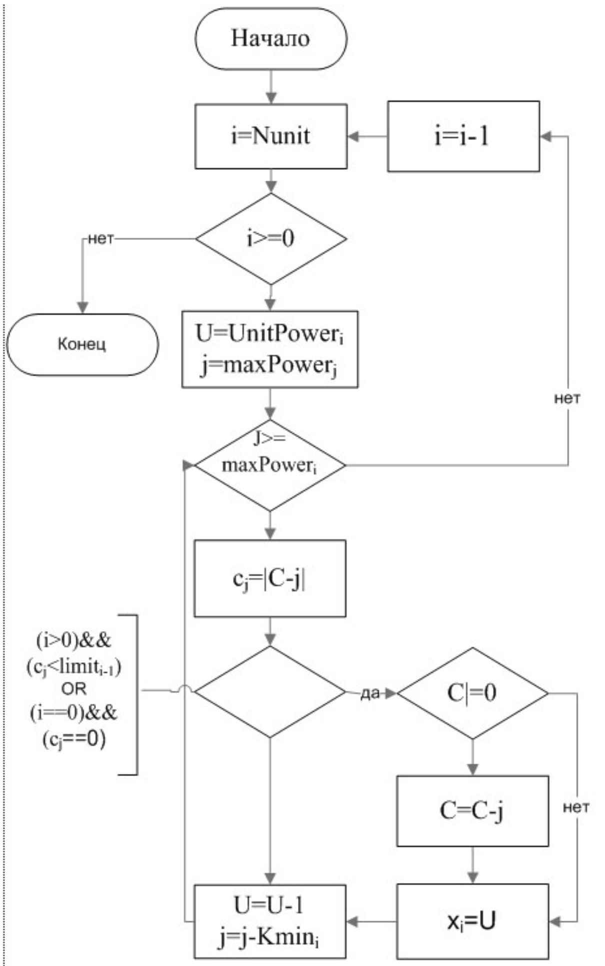

Рис. 1. Алгоритм восстановления семантического вектора по значению ЦСД

Алгоритм использует значение ЦСД и данные о структуре дескрипторного пространства. Основная идея алгоритма заключается в том, что восстановление СВ начинается с просмотра старшей из основных единиц и сравнений значения ее степени с текущим значением ЦСД. Если модуль разности между текущим значением ЦСД и текущим значением степени меньше значения предела степени предыдущей основной единицы, то текущая степень основной единицы совпадает с текущей компонентой (координатой) СВ (текущее значение степени пробегает диапазон от $maxPower$ до – $maxPower$). При этом из значения ЦСД вычитается взвешенное значение текущей степени основной единицы и восстановление СВ продолжается для последующих координат до исчерпания полного списка основных единиц. По завершении анализа всех составляющих ЦСД, в СВ $\{x_i\}$ хранится восстановленное значение размерности.

Заключение

В работе показаны проблемы контроля функциональности ПО ИУС, основанного на оценке семантической корректности, обусловленные значительной ресурсоемкостью.

Предложен метод эффективного представления семантической информации, основанный на использовании целочисленного семантического отображения.

Доказана возможность построения ЦСО ограниченной области СП в упорядоченное множество целочисленных семантических дескрипторов.

Сформулированы необходимые условия изоморфизма. Исследованы свойства разработанного ЦСО. Показана возможность использования ЦСД для контроля ПО и вычислительных процессов реального времени. Рассмотрены алгоритмы, реализующие ЦСО.

Исследованы свойства ЦДСП. Определена аксиоматика целочисленной дескрипторной алгебры, использование которой позволяет снизить на порядок уровень вычислительной мощности, необходимой для формального доказательства семантической корректности ПО ИУС, и повысит достоверность вычислительных процессов, протекающих в реальном времени.

Показано, что применение ЦСО позволяет на порядок снизить дополнительные ресурсные затраты на реализацию семантического контроля функциональности ПО ИУС.

Дальнейшие исследования целесообразно выполнять в направлении исследования алгебраических методов восстановления семантической информации.

Литература

1. Харченко В.С., Манжос Ю.С., Петрик В.Л. Статистический анализ программного обеспечения системы управления космическим аппаратом и оценка проверяющей способности семантического контроля // Технология приборостроения. – 2002. – № 2. – С. 52-59.

2. Манжос Ю.С. Оценка эффективности независимой верификации программного обеспечения // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7. – С. 210-214.

3. Петрик В.Л. Экспертиза программного обеспечения информационно-управляющих систем с использованием дескрипторного семантического пространства // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 2(21). – С. 29-35.

4. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа: учебник для вузов. – М.: Наука, 1989. – 624 с.

5. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1977. – 744 с.

6. Конорев Б.М., Петрик В.Л. Обоснование выбора системы физических единиц для формальной верификации программного обеспечения // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2006. – № 33. – С. 116-120.

7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1979. – 944 с.

Поступила в редакцию 7.09.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Вартанян, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.