

УДК 681.178

"Физическая" теорема Нётер в фотонике и computer science

Часть II*

П. А. Правильщиков

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Продemonстрировано использование в computer science дискретного путезависимого формализма D-алгоритмов, "оптического" принципа Ферма и известной "физической" теоремы Нётер для вывода закона сохранения перебора, количественная форма которого имеет вид $Pr_{\min} = 2N - n - t = \text{const}$. Показано, что этот закон обосновывает возможность создания новой архитектуры ЭВМ с механизмом гипермассового параллелизма для решения различных уравнений. Приводится краткое сравнение путезависимых формализмов Р. Фейнмана, С. Мандельстама и М. Менского, а также дискретного путезависимого формализма с точки зрения их использования в виде компьютерных программ для расчетов и моделирования различных физических процессов. Дан краткий обзор корреляционных экспериментов и их связи с сохранением различных величин (в частности, с законом сохранения лептонного числа). Указано на возможность использования дискретного путезависимого формализма и механизма гипермассового параллелизма в вычислительных экспериментах для моделирования процессов взаимодействий фотонов в корреляционных экспериментах и лептонных взаимодействиях.

* Часть I данной статьи опубликована в журнале "Прикладная физика" № 6 за 2005 г. В этой части нумерация рисунков и таблиц продолжается.

Построение D -цепи осуществляется формально по правилам пересечений D -кубов [1]. В табл. 7 приводятся правила пересечений, которые модифицированы и уточнены в целях десеквенции D -алгоритмов в [2—4].

построением существенного пути и набора X_i , то виртуальный путь $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_i)$ превращается в реальный $\pi_{r,s}^\delta(\omega_r, X_i)$, а набор X_i становится об-

Таблица 7

Таблица правил пересечения для D -алгоритмов

Значения x_j в координате (столбце) j таблицы истинности или таблицы D -кубов элемента φ_k	Значения y_j в координате j тест-куба TC_q				
	0	1	D	D'	\sim
0	0	\emptyset	\emptyset	0	0
1	\emptyset	1	1	\emptyset	1
D	\emptyset	D	D	\emptyset	D
D'	D'	\emptyset	\emptyset	D'	D'
\sim	0	1	D	D'	\sim

Подчеркнем, что обеспечить внутренние условия $C_{\omega_k}^{TB}$ транспортировки по построенной D -цепи еще недостаточно для решения прямой задачи. Необходимо проверить, что в дуге 6 появится значение 0, необходимое для непротиворечивого сцепления с выбранным D -кубом $D'0D'$ (см. ч. I) [5]. Для этого следует найти и пересечь некоторую строку $s_{2,1}$ из таблицы истинности элемента φ_2 (И-НЕ) (см. табл. 2 ч I). Такой строкой является четвертая строка $s_{2,4}$: 1 1 0. Эту строку следует "пересечь" с ранее построенным тест-кубом TC_3 :

		1	2	3	4	5	6	7	
φ_2 (И-НЕ)	$TC_3 =$	D	0	1	1	D'	0	D'	
	$s_{2,4} =$			1	1		0		
	\cap	$TC_4 =$	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	
			D	0	1	1	D'	0	D'

Данное пересечение непусто: $TC_3 \cap s_{2,4} \neq \emptyset$. Это означает, что данное пересечение не является противоречивым, следовательно, прямая задача решена.

Теперь для демонстрации решения обратной задачи с помощью алгоритма DALG воспользуемся тем же комбинационным устройством (КУ) (см. рис. 1, ч. I) и той же неисправностью $\equiv 0_1$. Для ее проявления (т. е. для выполнения условий проявления $\equiv 0_1$) поместим символ D в дуге 1. Этого вполне достаточно, так как $\equiv 0_1$ располагается на внешнем входе 1 КУ. После этого можно перейти к построению виртуального существенного пути $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_i)$ [4]. Заметим, что если тот или иной D -алгоритм успешно завершается наруживающим набором X_{i,ω_r} . Алгоритм DALG осуществляет построение виртуального пути в прямом направлении, т. е. от места неисправности $\equiv 0_1$ в дуге 1 до дуги 7. Это значит, что на первом шаге алгоритма DALG осуществляется пересечение с D -кубами из таблицы D -кубов элемента φ_1 (ИЛИ-НЕ), и только затем с D -кубами — из таблицы D -кубов элемента φ_3 (M2)

		1	2	3	4	5	6	7
φ_1 (ИЛИ-НЕ)	$TC_0 =$	D	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim
	$\sigma_1 =$	D	0			D'		

φ_3 (M2)	$\sigma_3 =$					D'	0	D'
	\cap					\dots	\dots	\dots
	$TC_3 =$	D	0	1	1	D'	0	D'

После достижения D -цепью внешнего выхода 7 следует перейти к операции "совмещение", т. е. осуществить пересечение со строкой $s_{2,4}$ таблицы истинности элемента φ_2 (И-НЕ):

		1	2	3	4	5	6	7
φ_2 (И-НЕ)	$TC_3 =$	D	0	1	1	D'	0	D'
	$s_{2,4} =$			1	1		0	
	\cap							
	$TC_4 =$	D	0	1	1	D'	0	D'

Так как процесс пересечения оказался успешным, то можно констатировать, что входной набор X_{i,ω_r} полностью построен, и обратная задача решена.

Следует заметить, что полученное решение является минимальным. Здесь не рассматривался процесс перебора строк: мы сразу выбирали "результативную" строку, т. е. строку, дающую непустое пересечение с соответствующим тест-кубом TC_q . Кроме того, мы не рассматривали путь соединений, т. е. путь, состоящий из дуг, по которым распространяется сигнал S . Этот путь можно выделить с помощью статистического анализа заранее еще до начала построения D -цепи, отмечая дуги пути соединений с помощью символов D (D'). В результате будут получены два тест-куба-полуфабриката T_1 и T_2 :

		1	2	3	4	5	6	7
	$T_1 =$	D				D'		D'
	$T_2 =$	D				D'		D

Тест-кубы-полуфабрикаты необходимы для последующей десеквенции D -алгоритмов. Теперь приведем минимальное решение прямой и обратной задач с помощью новых модификаций алгоритмов T-D и DALG с участием тест-кубов-полуфабрикатов. Заметим, что в начале выполнения этих алгоритмов исходный тест-куб TC приравнивается к тому или иному тест-кубу-полуфабрикату. Прямая задача решается путем исполь-

зования алгоритма T-D. Сначала выбирается первый тест-куб-полуфарикат T_1

		1	2	3	4	5	6	7
	$TC_0 =$	D	0	1	1	D'	\sim	D'
φ_2 (И-НЕ)	$s_{2,4} =$			1	1			0
φ_1 (ИЛИ-НЕ)	$\sigma_{1,1} =$	D	0			D'		
φ_3 (M2)	$\sigma_{3,3} =$					D'	0	D'
	\cap	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
	$TC_4 =$	D	0	1	1	D'	0	D'

В результате минимального решения прямой задачи получен такой же конечный тест-куб TC_4 . Аналогичный результат будет получен и при осуществлении минимального решения обратной задачи с помощью модификации DALG:

		1	2	3	4	5	6	7
	$TC_0 =$	D	\sim	\sim	\sim	D'	\sim	D'
φ_1 (ИЛИ-НЕ)	$\sigma_{1,1} =$	D	0			D'		
φ_3 (M2)	$\sigma_{3,3} =$					D'	0	D'
φ_2 (И-НЕ)	$s_{2,4} =$			1	1		0	
	\cap	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
	$TC_4 =$	D	0	1	1	D'	0	D'

Выше все пересечения со строками осуществляются последовательно, т. е. значение в одной координате тест-куба TC_q пересекается со значением в той же координате куба (строки) таблицы истинности или D -куба таблицы D -кубов:

		1	2	3	4	5	6	7
	$TC_0 =$	D	\sim	\sim	\sim	D'	\sim	D'
φ_1 (ИЛИ-НЕ)	$\sigma_{1,1} =$	D	0			D'		
	\cap	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
	$TC_4 =$	D	0	\sim	\sim	D'	\sim	D'

Здесь выполнены три операции пересечения $D \cap D = D$, $\sim \cap 0 = 0$ и $D' \cap D' = D'$, каждая из которых может характеризоваться в энергетическом и временном аспектах. В случае решения прямой и обратной задач с помощью D -алгоритма для каждой пары $(TC_q, s_{k,l})$ процесс решения осуществляется путем последовательного выполнения элементарных операций α_γ пересечения по известным правилам пересечения. Отсюда и возникает мысль принять в качестве временной (энергетической) диагностической единицы перебора (вдеп) среднее время Δt_γ (или энергию ΔE_γ) выполнения одной

операции α_γ пересечения значений в одной и той же координате двух кубов: тест-куба TC_q и строки $s_{k,l}$ из некоторой таблицы элемента φ_k . Если величина $P\Gamma^{ПЗ}(X_{i,\omega_r}, \omega_r)$ или $P\Gamma^{O3}(X_{i,\omega_r}, \omega_r)$ рассматривается во временном аспекте, то вместо деп будем писать вдеп (временная деп). Если величина $P\Gamma^{ПЗ}(X_{i,\omega_r}, \omega_r)$ или $P\Gamma^{O3}(X_{i,\omega_r}, \omega_r)$ рассматривается в энергетическом аспекте, то в качестве деп можно принять (среднюю) энергию выполнения той же самой операции α_γ . В этом случае будем писать эдеп (энергетическая деп). Внесистемные единицы перебора вдеп и эдеп легко привести к существующим системным единицам: секундам (наносекундам) и джоулям (миллиджоулям).

Кроме приведенных временных и энергетических единиц перебора, возвращаясь к понятию действия (ч. I) и выражениям (4)—(6) в ч. I, можно ввести для измерения перебора и диагностическую единицу перебора действия — ддеп. В нашем простейшем случае дискретного движения в лабиринте в соответствии с определением понятия действия 1 ддеп определяется следующим образом: 1 ддеп = 1 вдеп \times 1 эдеп.

Повторим, что здесь приведено минимальное решение прямой и обратной задач. Минимальное решение прямой и обратной задач отображается минимальным диагностическим лабиринтом Λ_{\min} , который является частным случаем вычислительного лабиринта Λ .

Примеры минимальных лабиринтов $\Lambda_{\min}^П$ и Λ_{\min}^M для рассматриваемых прямой и обратной задач приведены на рис. 2, 3 и рис. 1 (см. в ч. I). Неминимальное решение тех же задач отображается неминимальными (типичными) диагностическими лабиринтами $L^{ПЗ}$ и L^{O3} , которые представлены на рис. 4 и 5. Из рис. 2—5 легко понять, как из типичных лабиринтов $L^{ПЗ}$ и L^{O3} получить минимальные. Для этого результативное (непустое) пересечение со строкой той или иной таблицы следует поставить на первое место (точнее, строку в таблице следует поставить на первое место).

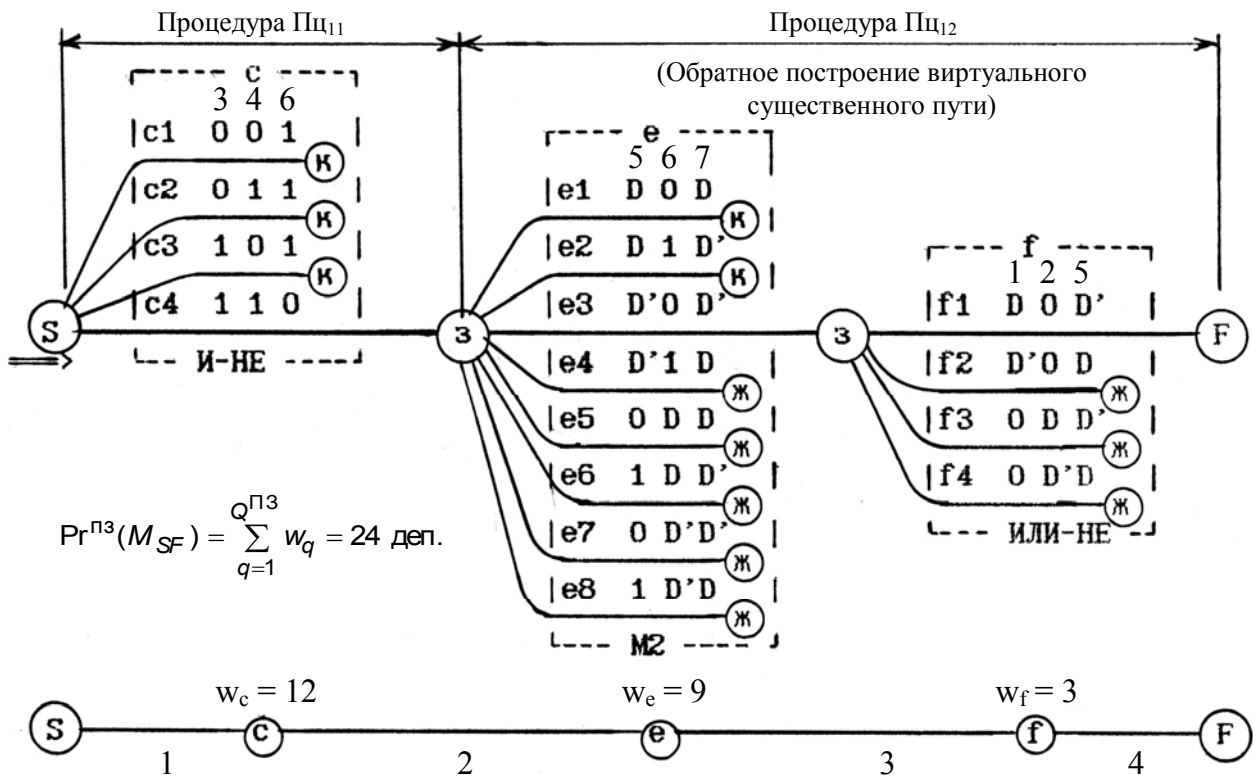


Рис. 2. Диагностический лабиринт $L_{0,1}$ решения прямой задачи (алгоритм $A_{0,1}$) и его редуцированный граф $G_{0,1}$

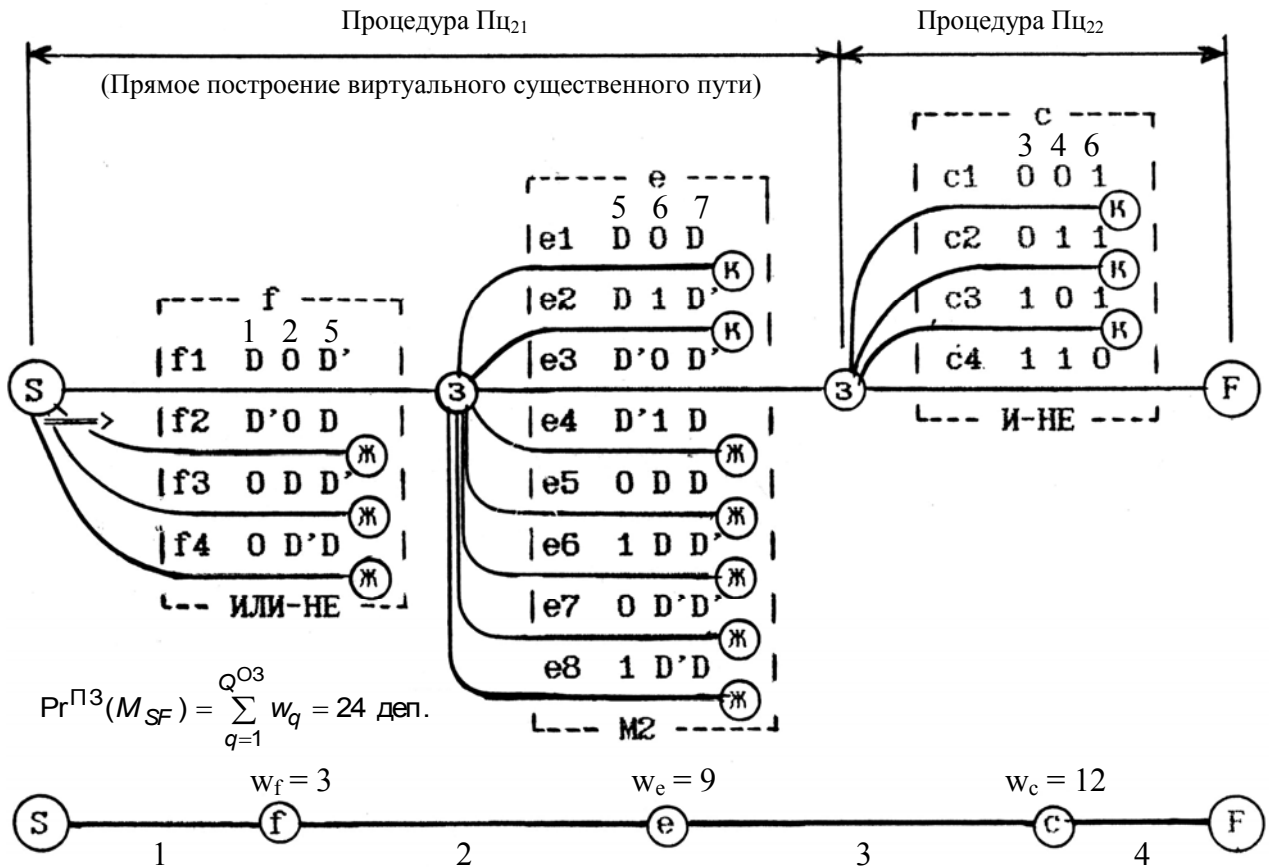


Рис. 3. Диагностический лабиринт $L_{0,2}$ решения обратной задачи (алгоритм $A_{0,2}$) и его редуцированный граф $G_{0,2}$

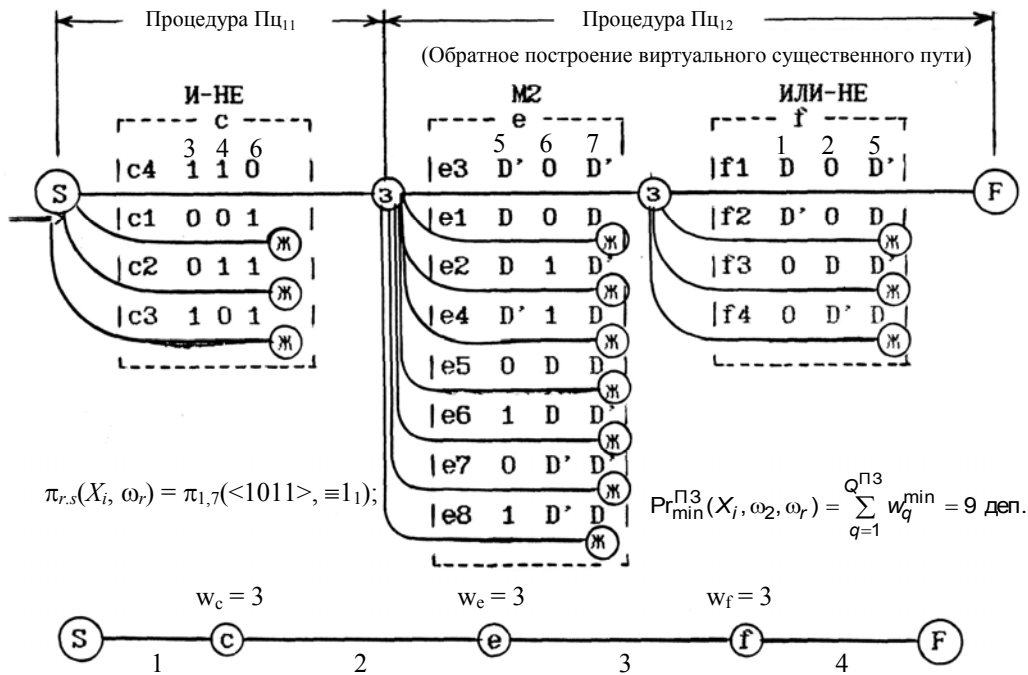


Рис. 4. Минимальный диагностический лабиринт $\Lambda_{0,1}$ решения прямой задачи (алгоритм $A_{0,1}$) и его редуцированный граф $\Gamma_{0,1}$

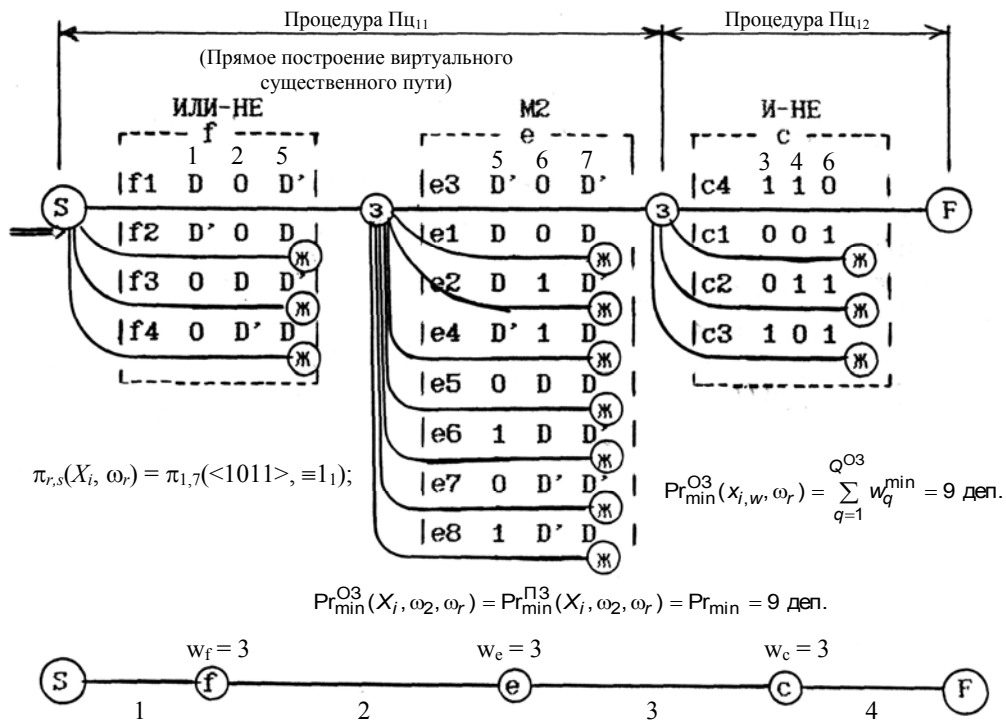


Рис. 5. Минимальный диагностический лабиринт $\Lambda_{0,2}$ решения обратной задачи (алгоритм $A_{0,2}$) и его редуцированный граф $\Gamma_{0,2}$

Существует и другой метод получения минимального решения и соответствующего ему минимального лабиринта Λ_{\min} . Суть его состоит в десеквенции D -алгоритмов, и о нем будет сказано ниже. Заметим, что в нашем случае $t = t_F$, где t_F — момент достижения конечной вершины F в некотором лабиринте $\Lambda_{0,j}$, отражающем процесс решения прямой или обратной задачи (см. рис. 2—5); $t_0 = t_S$, где t_S — момент начала движения в вершине S . В соответствии с

приведенными ранее обозначениями символом Δt_γ обозначим промежуток времени выполнения операции α_γ ; $\Delta t_\gamma = 1$ вдеп. Возвращаясь к выражениям (4)—(6) в ч. I, заметим, что говорить о кинетической и потенциальной энергии имеет смысл в случае непрерывного движения некоторого физического тела в поле внешних сил. При изучении движения в лабиринте $\Lambda_{0,j}$ не имеет смысла говорить о кинетической или

потенциальной энергии^{*}, но можно говорить о средней энергии и среднем времени выполнения операции α_γ при движении в лабиринте Λ_{0j} . Тогда величину \hat{S} действия при полном прохождении маршрута M_{SF} в лабиринте можно определить следующим образом:

$$\hat{S} = \sum_{i=t_S}^{t_F} \Delta E_i \cdot \Delta t_i. \quad (1)$$

В нашем случае движения в лабиринте величину \hat{S} можно рассматривать как некоторый аналог величины S^* в выражении (4) в ч. I (т. е. как некоторый аналог действия по Гамильтону). В принятой модели движения в лабиринте время и энергия считаются дискретными. Тогда в достаточно редком случае выполнения D -алгоритма по минимальной траектории, т. е. в случае движения по маршруту $M_{SF\min}$ в минимальном лабиринте Λ_{0j} от вершины S до вершины F , величина \hat{S} равна числу выполненных операций α_γ в процессе движения. При использовании D -алгоритмов операции α_γ выполняются по шагам в определенных "порциях", связанных с пересечением некоторой строки той или иной таблицы. Число Q_{\min} таких шагов в случае минимального решения равно K , т. е. числу логических элементов в КУ. На каждом шаге q того или иного из рассматриваемых D -алгоритмов при осуществлении пересечения тест-куба TC_q со строкой некоторой таблицы элемента φ_k выполняется w_q операций α_γ . Тогда величину действия, равную числу выполненных операций α_γ , для маршрута $M_{SF\min}$ можно вычислить по формуле

$$\hat{S} = \sum_{i=t_S}^{t_F} \Delta E_i \cdot \Delta t_i = \sum_{q=1}^K w_q, \quad (2)$$

где $K = Q_{\min}$ — число шагов алгоритма при движении в минимальном лабиринте Λ_{0j} (или, что то же самое, при движении в соответствующем ему редуцированном графе Γ_{\min} [4], а w_q — вес q -й вершины графа Γ_{\min} , выражаемый в ддеп). Нетрудно видеть, что для маршрута $M_{SF\min}$ в минимальном лабиринте Λ_{0j} величина \hat{S} действия минимальна. Следовательно, в том редком случае, когда траектория выполнения D -алгоритма пошла по маршруту $M_{SF\min}$, в лабиринте Λ_{0j} выполняется принцип наименьшего действия.

* Специфика дискретного перемещения в диагностическом лабиринте состоит не только в отсутствии поля внешних сил, но и в том, что отсутствует как таковое и физическое тело, обладающее массой (заметим, что по современным воззрениям физиков массой покоя не обладает и такая элементарная частица, как фотон). Но несмотря на это, перемещение в нашем лабиринте, т. е. построение тестов, — это движение. И это движение можно изучать, привлекая в известной мере математический аппарат, выработанный физиками на протяжении столетий.

В области computer science чаще требуется выразить время \hat{T} движения по минимальному маршруту $M_{SF\min}$ в лабиринте Λ_{0j} . В этом случае величина \hat{T} равна

$$\hat{T} = \sum_{i=t_S}^{t_S} \Delta t_i = \sum_{q=1}^K w_q, \quad (3)$$

где w_q — вес q -той вершины минимального редуцированного графа Γ_{\min} , выражаемый во вдеп, т. е. время движения в минимальном лабиринте Λ_{0j} .

Следовательно, и в случае, когда траектория выполнения D -алгоритма пошла по маршруту $M_{SF\min}$ в минимальном лабиринте Λ_{0j} выполняется принцип наименьшего времени (принцип Ферма).

При записи выражений (1)—(3), как и при записи выражений (4)—(5) в ч. I, удалось обойтись без интегралов ("интегралов по траекториям"). В computer science так же, как в классической и квантовой механике, математический уровень точности должен быть адекватен поставленной задаче с учетом возможностей и архитектуры вычислительных средств. Современная архитектура последних является дискретной. В результате "красивые" интегралы, фигурирующие в публикациях, в программах для ЭВМ превращаются в конечные суммы. В соответствии с научно-техническим (экспериментально-физическим) идеалом научности знания цель решения задачи достигнута, если утверждения, необходимые для ее решения, истинны, а решение имеет опытную (практическую) оправдываемость^{**}.

Наибольший интерес для практики должна вызывать минимальная траектория выполнения D -алгоритма, т. е. траектория движения по маршруту $M_{SF\min}$ в минимальном диагностическом лабиринте Λ_{0j} . Решение прямой и обратной задач для многих известных КУ (например для схем Шнейдера и Гоэла^{*}) и их анализ приводят к мысли о том, что при движении в минимальном диагностическом лабиринте число операций α_γ при решении прямой задачи равно числу операций α_γ при решении обратной задачи. Это указывает на наличие некоторого закона сохранения — закона сохранения перебора, для чего необходимо определить

** Напомним, что научность характеризует знание с точки зрения его архитектоники, формы отображения мира, которые определяются стандартами рациональности, принятыми в науке как сфере интеллектуального производства. Такими стандартами и выступают критерии научности знания того или иного идеала. Несомненно, что научностью с точки зрения математического идеала обладают все известные в computer science логико-математические теории и обоснованные ими алгоритмы вычислений. Но научность и истинность не совпадают. Истинность характеризует знание с точки зрения его соответствия действительности. Истинностью обладают и донаучные индуктивно-эмпирические, рецептурно-технологические знания. Наличие ножиц между научностью и истинностью приводит к тому, что наука, в том числе и фотоника, и computer science, включает в себя массу того, что не проходит и не пройдет практического испытания. Учитывая процессуальность практики, весь вопрос в том, как и когда это выяснится. Здесь имеются в виду упомянутые выше абстрактно-математические алгоритмы построения тестов, которые не удовлетворяют критерию практической оправдываемости из-за размерности реальных объектов диагностирования, но были опубликованы и, что удивительно, публикуются и сегодня.

скрытую внутреннюю симметрию рассматриваемых лабиринтов. Исходя из внутренней симметрии можно доказать некоторый аналог теоремы Нётер.

Для минимальных решений прямой и обратной задач и соответствующих им минимальных диагностических лабиринтов $\Lambda_{\min}^{\text{ПЗ}}$ и $\Lambda_{\min}^{\text{ОЗ}}$ в [3, 4] доказан аналог теоремы Нётер для последовательных D -алгоритмов. В соответствии с аналогом этой теоремы величина Pr_{\min} перебора при решении прямой и обратной задач сохраняется и количественно определяется выражением

$$\text{Pr}_{\min} = 2N - n - m = \text{const}, \quad (4)$$

где N — число дуг в логической сети КУ, n и m — число его входов и выходов.

Величина Pr_{\min} перебора, выраженная во вдеп (или эдеп), позволяет определить понятие КПД для алгоритмов [4], что подтверждает мысль о том, что понятие КПД имеет общий характер и применимо к различным системам: электрическим генераторам, двигателям разного рода, полупроводниковым приборам, биологическим объектам. Теперь понятие КПД может служить и для сравнительной оценки эффективности вычислительных алгоритмов.

* См. статьи: *Schneider P. R.* On the necessity to examine D-chains in diagnostic test generation example// IBM Journal of Research and Development. 1967. № 1; *Goel P.* An implicit enumeration algorithm to generate tests for combinational logic circuits// IEEE Trans. on Computers. 1981. V. C-30. 1 3. March. P. 215—222.

Как отмечалось выше, для получения минимального решения и соответствующего ему минимального лабиринта Λ_{\min} можно использовать десеквенцию D -алгоритмов. Суть предлагаемой десеквенции состоит в параллельном выполнении элементарных операций α_γ пересечения с помощью аппаратно-реализованных

	1	2	3	4	5	6	7	$q = 1; \text{Pr}_{q,t} = \text{Pr}_{1,t} = 3$ вдеп;
$TC_0 =$	D	\sim	\sim	\sim	D'	\sim	D'	$\text{Pr}_{q,E} = \text{Pr}_{1,E} = 3$ эдеп;
$fI =$	D	0	\sim	\sim	D'	\sim	\sim	fI — строка таблицы D -кубов элемента ϕ_1 (ИЛИ-НЕ) —
\cap	\cap — см. таблицы D -кубов в ч. I.
$TC_1 =$	D	0	\sim	\sim	D'	\sim	D'	

Для последовательного выполнения трех операций α_γ на шаге q ($q = 1$) требуются время $\text{Pr}_{q,t} = 1$ вдеп и энергия $\text{Pr}_{q,E} = 3$ эдеп. Здесь 1 вдеп = Δt нс; 1 эдеп = ΔE мДж. Если же три операции α_γ выполняются параллельно, время $t_q = \text{Pr}_{q,t} = \text{Pr}_{1,t}$ построения TC_1 равно $\Delta t^{\text{пп}}$ нс (здесь 1 вдеп = $\Delta t^{\text{пп}}$ нс). Символ $\Delta t^{\text{пп}}$ обозначает время выполнения одной операции α_γ с помощью одного БП B_j в механизме гипермассового параллелизма. Величина $\Delta t^{\text{пп}}$ не меняется, если не один, а несколько БП, параллельно осуществляют операции α_γ . В этом примере для выполнения трех операций α_γ в трех координатах 1, 2 и 5 понадобятся три блока B_j . Поэтому затраты энергии $E_q =$

комбинационных блоков пересечения (БП). Каждый БП B_j соединен с двумя битами ОЗУ компьютера и осуществляет только одну операцию α_γ .

Таким образом, один байт ОЗУ соединен с четырьмя БП. Следовательно, 64 Мб такого ОЗУ, называемого активным, содержат более 256 млн БП ($64\,000\,000 \times 4 = 256\,000\,000$ БП). Таким образом, 64 Мб активного ОЗУ содержат 256 млн элементарных вычислительных модулей, которые образуют механизм гипермассового параллелизма в сопроцессоре для ПК. Заметим, что для каждого ПК объем его активного ОЗУ является величиной масштабируемой и может наращиваться потенциально неограниченно, как и объем обычного (пассивного) ОЗУ. Объем аппаратуры БП невелик: каждый БП содержит небольшое число логических элементов (в настоящее время удалось создать БП, содержащий не более восьми вентиляей). Отсюда 64 Мб активной ОП содержат приблизительно $256\,000\,000 \times 10 = 2,56$ млрд логических элементов. Такой объем аппаратуры, по современным представлениям, невелик, особенно если его сравнивать с объемом аппаратуры современных кластеров, но увеличение объема аппаратуры ПК в процессе решения уравнений превращает его в мощный суперкомпьютер.

Теперь можно продемонстрировать результат десеквенции D -алгоритмов при решении обратной задачи. Выше приводилось построение существенного пути при решении обратной задачи. Здесь достаточно привести фрагмент ее последовательного решения, когда, например, на шаге $q = 1$ для построения тест-куба TC_1 из исходного тест-куба TC_0 необходимые операции α_γ осуществляются последовательно:

$\text{Pr}_{q,E} = \text{Pr}_{1,E}$ на построение TC_1 равны $3 \times \Delta E^{\text{пп}}$ мДж (1 эдеп = $\Delta E^{\text{пп}}$ и $3 \Delta E^{\text{пп}} = 3$ эдеп), где $\Delta E^{\text{пп}}$ — затраты энергии, необходимой для выполнения одной операции α_γ с помощью блока B_j . Величина $\Delta E^{\text{пп}} < \Delta E^{\text{пс}}$, но с ростом числа $N_{\text{БП}}$ блоков B_j растут и общие расходы энергии, потребляемой БП. При использовании механизма гипермассового параллелизма за интервал $\Delta t^{\text{пп}}$ нс времени (т. е. за 1 вдеп) можно одновременно осуществить пересечение тест-куба TC_0 не с одной строкой, как это показано выше, а сразу со всеми строками таблицы D -кубов (таблицы истинности или таблицы T_{pdf}) рассматриваемого элемента ИЛИ-НЕ. Для КУ на рис. 1 (ч. I) пересечение

тест-куба TC_0 со всеми строками таблицы D -кубов элемента φ_1 — ИЛИ-НЕ (см. соответствующую таблицу D -кубов) можно представить и так:

граммно, как в случае последовательного выполнения, а аппаратурно с помощью комбинационных блоков B_j . Важно также и то, что общий результат в виде тест-куба TC_1 и время его получения не зависят от порядка расположения строк в таблице D -кубов (в таблице истинности либо в таблице T_{pdf}), как это происходит в типичном лабиринте $L_{0,j}$ (см. рис. 4 и 5). Это означает, что механизм гипермассового параллелизма позволяет избегать затрат времени на преодоление локальных тупиков, т. е. "красных" вершин в диагностическом лабиринте — вершин, отмеченных буквой "к" на рис. 4 и 5.

В работе [4] показано, что вероятность p выполнения последовательного D -алгоритма по минимальной

$$TC_0 = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 2 & 5 & 1 & 2 & 5 \\ D & \sim & D' & D & \sim & D' \\ \text{Строки } f1-f4 & D & 0 & D' & D' & 0 & D \\ \cap & - & - & - & - & \dots \\ TC_1 = & D & 0 & D' & \emptyset & 0 & \emptyset \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{c} \begin{array}{ccc|ccc|cccc} 1 & 2 & 5 & 1 & 2 & 5 & 3 & 4 & 6 & 7 \\ D & \sim & D' & D & \sim & D' & \sim & \sim & \sim & D' \\ 0 & D & D' & 0 & D' & & & & & \\ - & - & \dots & - & - & \dots & & & & \\ \emptyset & D & D' & \emptyset & D' & \emptyset & \sim & \sim & \sim & D' \end{array} \end{array}$$

Здесь строки $f1-f4$ берутся из таблицы D -кубов элемента φ_1 (ИЛИ-НЕ). Для получения TC_1 требуется одновременно за интервал Δt^{np} времени (за 1 вдеп) выполнить 12 операций α_γ , для чего понадобится 12 блоков B_j ($Pr_{1,E} = 12$ эдеп). Если в соответствии с правилами D -алгоритмов "отфильтровать" полученный результат с помощью специальных схем фильтрации тест-кубов, а затем переписать его в соответствующем виде, то получим такой же тест-куб, как и TC_1 (см. выше):

$$TC_1 = \begin{array}{ccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ D & 0 & \sim & \sim & D' & \sim & D' \end{array}$$

По сравнению с последовательным выполнением 12 операций α_γ здесь получен выигрыш во времени много более чем в 12 раз, так как все операции α_γ выполняются параллельно за один интервал Δt^{np} нс. Время $\Delta t^{np} \ll \Delta t$, так как операции α_γ пересечения в случае параллельного выполнения D -алгоритмов реализуются не протельные D -алгоритмы 3-го типа естественным образом подчиняются принципу Ферма, как подчиняются ему в природе кванты света — фотоны. Это происходит за счет одновременного использования всех заданных тест-кубов-полуфабрикатов $T_\beta \in M_{pf}$, с каждым из которых связан тот или иной виртуальный путь $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$. Так, при решении и прямой, и обратной задач для рассматриваемого КУ (см. рис. 1 в ч. I) используется не один выбранный тест-куб-полуфабрикат, а оба тест-куба-полуфабриката из M_{pf} : $M_{pf} = \{T_1, T_2\}$. Поэтому для функционирования D -алгоритмов 3-го типа требуется достаточно большое число $N_{БП}$. Примером D -алгоритмов 3-го типа, решающих прямую и обратную задачи, являются алгоритмы $A_{3,1}$ и $A_{3,2}$. Алгоритм $A_{3,1}$ можно рассматривать как результат десеквенции алгоритма $A_{0,1}$ (см. ч. I),

траектории (т. е. движения по минимальному маршруту M_{SFmin} в лабиринте L_{min}^∂) с ростом размерности объекта диагностирования быстро уменьшается. Поэтому в [4] было показано, что для преодоления ограничений закона сохранения перебора (4) необходимо использовать параллельно-последовательные D -алгоритмы и новую архитектуру вычислительных средств с механизмом гипермассового параллелизма (архитектуру "вычислительного решета"*). Существуют четыре типа таких алгоритмов. Здесь будут рассмотрены только параллельно-последовательные D -алгоритмы 3-го типа, гарантирующие выполнения принципа Ферма, на который опирается симметрия диагностических лабиринтов и, следовательно, закон сохранения перебора для них. Это означает, что параллельно-последова-

* Термин "вычислительное решето" был выбран по аналогии с математическим термином "решето Эратосфена" из математической теории чисел.

тогда как алгоритм $A_{3,2}$ — как результат десеквенции алгоритма $A_{0,2}$. Так как всякому тест-кубу-полуфабрикату $T_\beta \in M_{pf}$ соответствует некоторый виртуальный путь $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$, то одновременное использование всех T_β при проверке равенства $X_i = X_{j,\omega_r}$ (прямая задача) или при построении набора X_{j,ω_r} (обратная задача) в D -алгоритмах 3-го типа означает параллельное построение всех путей $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$, т. е. движение по всем путям.

Это означает, что лабиринт $L_{3,j}$ в этом случае состоит из нескольких несвязных компонент Km_β [3, 4]. Процесс движения в $L_{3,j}$ осуществляется параллельно по каждому маршруту M_{SF} в этих компонентах. Всякий такой маршрут M_{SF} соответствует построению одного виртуального существенного пути. Движение с помощью алгоритма $A_{3,j}$ по всем маршрутам M_{SF} в лабиринте $L_{3,j}$ ликвидирует опасность возникновения не только локальных, но и глубоких тупиков. Возможность избегать и локальные, и глубокие тупики позволяет заново установить свойства симметрии диагностического лабиринта, отображающего параллельно-последовательный процесс построения тестов. После этого можно вывести новую количественную форму закона сохранения перебора уже для параллельно-последовательных D -алгоритмов 3-го типа. Заметим, что в случае возникновения хотя бы одного тупика в некоторой несвязной компоненте Km_β диагностического лабиринта $L_{3,j}$ движение в ней, т. е. ее построение, прекращается, так как в минимальном маршруте отсутствуют "пустые" пересечения, что экономит объем активной оперативной памяти.

Теперь рассмотрим несвязную компоненту Km_β в лабиринте $L_{3,j}$. На шаге q параллельно-

последовательных D -алгоритмов 3-го типа для некоторого строящегося виртуального пути $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$ параллельные пересечения построенного (текущего) тест-куба TC_q осуществляются со всеми строками тех или иных таблиц, как правило, не одного логического элемента ϕ_k , а некоторого их подмножества $Fr_{q(\beta)}$ ($Fr_{q(\beta)} \in V_{LC}$).

енного T_β . Так, фронт $Fr_{q(\beta)} = \Psi_\beta$ в процедуре Π_{12} (процедуре "обратного" построения виртуального пути) в алгоритме $A_{3,1}$, решающем прямую задачу, и в процедуре Π_{21} (процедуре "прямого" построения такого же пути $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$) в алгоритме $A_{3,2}$, решающем обратную задачу; в процедуре Π_{11} определяются значения в узлах КУ в алгоритме $A_{3,1}$ (прямая задача) и в процедуре Π_{22} совмещения в алгоритме $A_{3,2}$ (обратная задача) фронт $Fr_{q(\beta)} = M_{\rho, E_\beta}$. Так как в D -алгоритмах 3-го типа

Алгоритм $A_{3,2}$ (обратная задача)	осуществляется построение всех виртуальных путей $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$, то полный фронт Fr_q на каждом шаге q этих алгоритмов определяется как объединение фронтов $Fr_{q(\beta)}$.
$q = 1; \quad Fr_1 = \Psi_1 = \{\phi_1, \phi_2\};$	Отметим, что существует глубокая аналогия между параллельными пересечениями для подмножества таблиц элементов ϕ_k , входящих во фронт $Fr_{q(\beta)}$ и параллельными пересечениями, выполняемыми в процессе сортировки шариков отверстиями решета некоторого виртуального автомата — см. [4]. Для КУ на рис. 1 (ч. В) в табл. 8 — 1 приводится решение только обратной задачи. Это решение выполнено только за 2 шага и за 2 вдеп, как и предсказывает диагностический аналог теоремы Нётер для параллельно-последовательных D -алгоритмов 3-го типа [4].
Это подмножество Fr_q называется фронтом параллельно-последовательного D -алгоритма 3-го типа для виртуального пути $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$. Понятие фронта $Fr_{q(\beta)}$ для параллельно-последовательных D -алгоритмов является развитием понятия вектора активности для последовательных D -алгоритмов [1]. При этом для фронта $Fr_{q(\beta)}$ в "ранжированном" КУ имеются две возможности: $Fr_{q(\beta)} = M_{\rho, E_\beta}^{TC_{1(1)}}$ либо $Fr_{q(\beta)} = \Psi_\beta$. Если $Fr_{q(\beta)} = \Psi_\beta$, то наличие тест-куба-полуфабриката T_β позволяет осуществить построение виртуального существенного пути $\pi_{r,s}^\beta(\omega_r, X_j)$ всего за 1 вдеп на одном шаге q D -алгоритма 3-го типа. Это и объясняет необходимость использования предварительно постро-	

Окончание табл. 8

Алгоритм $A_{3,2}$ (обратная задача)				
Продолжение "прямого" построения первого виртуального существенного пути $\pi_{r,s}^1(\omega_r, X_j)$ (Процедура $\Pi_{2,1}$)				
Пересечение $TC_{0(1)}$ с D -кубами из их таблицы для элемента ϕ_3				
5 6 7 $TC_{0(1)} =$	5 6 7 $D' \sim D'$	5 6 7 $D' \sim D'$	5 6 7 $D' \sim D'$	5 6 7 $D' \sim D'$
Строки $s_{2,1}$	$0 D' D'$	$0 D D$	$1 D' D$	$1 D D'$
$TC_{1(1)} =$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

Таблица 9

Алгоритм $A_{3,2}$ (обратная задача)							
$q = 1; \quad Fr = \Psi_1 = \{\phi_1, \phi_2\};$	1	2	3	4	5	6	7
	$T_1 = D$	\sim	\sim	\sim	D'	\sim	D
"Прямое" построение второго виртуального существенного пути $\pi_{r,s}^2(\omega_r, X_j)$ (Процедура $\Pi_{2,1}$)							
Пересечение $TC_{0(1)}$ с D -кубами из их таблицы для элемента ϕ_1				Пересечение $TC_{0(1)}$ с D -кубами из их таблицы для элемента ϕ_3			

$TC_{0(1)} =$	1 2 5	1 2 5	1 2 5	1 2 5	5 6 7	5 6 7	5 6 7	5 6 7
Строки s_1	$D \sim D'$	$D \sim D'$	$D \sim D'$	$D \sim D'$	$D' \sim D$	$D' \sim D$	$D' \sim D$	$D' \sim D$
	$D 0 D'$	$D' 0 D$	$0 D D'$	$0 D' D$	$D' 0 D'$	$D 0 D$	$D' 1 D$	$D 1 D'$
$TC_{1(1)} =$	$D 0 D'$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$D' 1 D$	\emptyset

Окончание табл. 9

Алгоритм $A_{3,2}$ (обратная задача)

Продолжение "прямого" построения второго виртуального существенного пути $\pi_{r,s}^1(\omega_r, X_j)$				
(Процедура $\Pi_{2,1}$)				
Пересечение $TC_{0(1)}$ с D -кубами из их таблицы для элемента φ_3				
5 6 7	5 6 7	5 6 7	5 6 7	5 6 7
$TC_{0(1)} =$	$D' \sim D'$	$D' \sim D'$	$D' \sim D'$	$D' \sim D'$
Строки $s_{2,1}$	$0 D' D'$	$0 D D$	$1 D' D$	$1 D D'$
$TC_{1(1)} =$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

Таблица 10

Алгоритм $A_{3,2}$ (обратная задача)

$q = 2;$	$Fr_q = \{\varphi_2\}$	$TC_{1(1)} =$	1	2	3	4	5	6	7					
			D	0	\sim	\sim	D'	0	D'					
Процедура совмещения для первого пути $\pi_{r,s}^1(\omega_r, X_j)$														
(Процедура $\Pi_{2,2}$)														
Пересечение $TC_{1(1)}$ со строками таблицы истинности элемента φ_2														
	1	2	3	4	6	3	4	6	3	4	6	5	6	7
$TC_{1(1)} =$	D	0	\sim	\sim	0	\sim	\sim	0	\sim	\sim	0	D'	0	D'
Строки таблицы истинности \rightarrow			0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$TC_{2(1)} =$	D	0	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	1	1	0	D'	0	D'
	1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4		
$TC_{2(1)} =$	D	0	1	1	D'	0	D'		$X_{12} =$	$\langle 1 0 1 1 \rangle$				

Таблица 11

Алгоритм $A_{3,2}$ (обратная задача)

$q = 2;$	$Fr_q = \{\varphi_2\}$	$TC_{1(2)} =$	1	2	3	4	5	6	7					
			D	0	\sim	\sim	D'	0	D					
Процедура совмещения для второго пути $\pi_{r,s}^2(\omega_r, X_j)$														
(Процедура $\Pi_{2,2}$)														
Пересечение $TC_{1(2)}$ со строками таблицы истинности элемента φ_2														
	1	2	3	4	6	3	4	6	3	4	6	5	6	7
$TC_{1(2)} =$	D	0	\sim	\sim	1	\sim	\sim	1	\sim	\sim	1	D'	1	D
Строки таблицы истинности \rightarrow			0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$TC_{2(2)} =$	D	0	0	0	1	0	1	1	\emptyset	\emptyset	\emptyset	D'	1	D
	1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4		
$TC_{2(2,1)} =$	D	0	0	0	D'	1	D		$X_9 =$	$\langle 1 0 0 0 \rangle$				
$TC_{2(2,2)} =$	D	0	0	1	D'	1	D		$X_{10} =$	$\langle 1 0 0 1 \rangle$				
$TC_{2(2,3)} =$	D	0	0	1	D'	1	D		$X_{11} =$	$\langle 1 0 1 0 \rangle$				

Изложив и продемонстрировав на примере построения тестов дискретный путезависимый формализм, основанный на исчислении кубических комплексов, следует показать, чем он отличается от существующих формализмов в физике. В частности, чем он отличается

от интегралов по траекториям Р. Фейнмана [6], от путезависимого формализма С. Мандельштама [7, 8] и от "группового" развития М. Менским [9] путезависимого формализма Мандельштама (т. е. от формализма, основанного на группе путей). Следует показать также,

чем он может быть полезен в фотонике и, в частности, для решения проблем, связанных с квантовой телепортацией и сцепленным (entangled) состоянием* квантовых объектов.

Известно, какими преимуществами обладают фейнмановские интегралы по траекториям в сравнении с математическим аппаратом И. Шредингера и матричной механикой В. Гейзенберга. Фейнмановские интегралы используют понятие действия и вариационные принципы классической физики. Однако их существенный недостаток состоит в трудоемкости вычисления даже для современных ЭВМ. В 1962 г. С. Манделштам [7, 8] предложил качественно новый формализм путей в квантовой физике [7, 8]. Ранее состояния частиц в координатном представлении описывались с помощью функций, зависящих от точки пространства—времени $\psi(x)$. Манделштам рассмотрел функции, зависящие от путей**, ведущих в эти точки $\Psi[x]$. При этом можно утверждать, что формализм Манделштама является избыточным [9]: функции от путей $\Psi[x]$ удовлетворяют дополнительным условиям, с помощью которых их можно свести к функциям от точек $\psi(x)$. Важное преимущество функций от путей состоит в том, что они не содержат специфического произвола, которым обладают функции от точек. Речь идет о произволе, связанном с группой калибровочных преобразований: если $\psi(x)$ — состояние заряженной частицы в электромагнитном поле $A_\mu(x)$, то имеется произвол, описываемый калибровочными преобразованиями [7, 8]. Формализм описания заряженной частицы в поле устроен так, что остается инвариантным при калибровочном преобразовании, поэтому в физически наблюдаемых величинах никакого произвола нет, и, таким образом, произвол в теории является как бы фиктивным. Но именно поэтому хотелось бы иметь формализм, который не содержит произвола вовсе. Вот этим и отличается формализм Манделштама. Технически процедура интегрирования (суммирования) по путям и в подходе Фейнмана, и в формализме Манделштама одинаково сложна, очень важно, однако, что классический характер альтернатив (траекторий) делает расчеты в обоих подходах чрезвычайно наглядными. Подобная наглядность становится особенно важной при различных обобщениях теории, при попытках выйти за пределы установленных закономерностей, что и происходит при

попытках математического описания квантовой телепортации.

Дальнейшее развитие путезависимого формализма связано с применением группового подхода, т. е. с выделением группы путей [9]. Группа путей и ее представление позволяют существенно упростить путезависимый формализм Манделштама, исключив многие сложные и искусственные построения, фигурировавшие в [7, 8]. Центральная идея Менского [9] при использовании группы путей состояла в том, чтобы показать, что пространственно-временное многообразие лишь приближенно описывает реальность. Более точную картину реальности дает сеть траекторий (путей), а точнее, функция, приписывающая каждой конфигурации путей некоторую амплитуду вероятности. Многое указывает на то, что группа путей и ее представление — это техника, в которой локальные и нелокальные элементы квантовой теории сходятся на один и тот же уровень и выражаются в терминах одних и тех же понятий. Следовательно, именно эта техника подходит для исследования взаимосвязи локальных и нелокальных аспектов теории, что особенно важно для теоретического анализа корреляционных экспериментов.

Однако и "групповой" формализм продолжает оставаться достаточно сложным аппаратом, плохо приспособленным к компьютерным вычислениям. В нем доминирует непрерывная (континуальная) математика: интегралы (вместо конечных сумм), ковариантные производные

и т. п. В отличие от "группового" формализма [9] дискретный путезависимый формализм предложенный в [2—4], и новое "неклассическое" исчисление кубических комплексов [10] опираются на дискретную математику (дискретный анализ), симметрическую группу S_n и лабиринтную модель движения, подчиняющуюся принципу Ферма*. Дискретный путезависимый формализм подогнан (или, как говорят, "заточен") под вычислительные средства на основе механизма гипермассового параллелизма [4], что позволяет решать с помощью компьютеров с новой архитектурой квантово-механические задачи значительно быстрее, чем алгоритмы на основе группового формализма. Последнее свойство позволяет осуществлять более точные предсказания на основе более широкой статистики вычислительного эксперимента. При этом в определенной степени исчезает классическая "наглядность", так как программно-алгоритмические реализации уравнений математической физики трудно воспринимаются человеком. Но теми же недостатками обладают и многомерные интегралы для вычисления амплитуды вероятностей путей**.

* Сцепленное состояние — это такое состояние, когда два квантовых объекта образуют как бы единое целое независимо от расстояния между ними. При желании можно говорить, что один из сцепленных объектов передает другому информацию о своем состоянии, причем передача происходит мгновенно. Передача информации связана с мгновенной передачей импульса. Эту информацию можно принять, измерив состояние другого объекта системы (т. е. измерив импульс другого объекта). В этом состоит смысл того, что почему-то назвали телепортацией. Здесь же заметим, что квантовое сцепление представляет собой связь между (или внутри) квантовыми системами, которая значительно сильнее, чем может быть любая классическая связь.

** Сейчас нас интересует путь независимо от того, как он параметризован. Поэтому используется несколько иное обозначение $[x]$ в отличие от (x) в интеграле по путям, где важна зависимость пути от времени.

* Первыми попытками применения алгоритмов управления и соответствующих математических формализмов является книга [11].

** По отношению к самому термину "амплитуда вероятности" существует много неясного, связанного с ее интерпретацией. Не случайно Р. Фейнман любил говаривать, что "его употребление делает меня значительнее". Необходимо подчеркнуть, что и вся квантовая механика в целом лишена классической наглядности, которую обычно связывают со здравым смыслом. Поэтому можно смело утверждать, что многие физики-теоретики воспользовались поразительной возможностью овладеть квантовыми объектами "математически, не понимая существа дела".

Теперь необходимо сделать краткий обзор корреляционных или, как их часто называют, ЭПР-экспериментов^{***}. В 1935 г. А. Эйнштейн, Б. Подольский и Н. Розен (ЭПР) опубликовали статью [14], в которой изложили мысленный опыт, указывающий, как они считали, на неполноту квантовой теории^{****}. Этот умозрительный опыт в дальнейшем и дал название целой серии ЭПР-экспериментов, суть которых сводится к следующему. Пусть принципом неопределенности установлено, что невозможно непосредственно измерить с произвольной точностью в одно и то же время положение и импульс одной частицы, тогда возникает мысль взять вторую частицу — "сообщницу". Располагая двумя частицами, можно одновременно измерять большее число величин. Если бы нам удалось каким-то образом заранее связать движение двух частиц (т. е. сделать так, чтобы частицы оказались в сцепленном состоянии), то измерения, выполненные одновременно над обеими частицами, позволили бы экспериментатору проникнуть сквозь завесу квантовой неопределенности, непреодолимую, по утверждениям Гейзенберга и Бора.

Рассуждения ЭПР, лежащие в основе их мысленного опыта, базируются на двух фундаментальных постулатах:

1) предполагалось, что измерение, проведенное в одном месте, не может мгновенно повлиять на частицу, находящуюся далеко от него (по сути так формулируется принцип локальности [12]);

2) предполагалось существование "объективной реальности" (это означало, что такие характеристики, как положение и импульс частицы, существуют объективно, даже если частица удалена, и эти характеристики непосредственно не наблюдаемы). Однако с приведенными постулатами не смог согласиться Н. Бор. По его мнению, нельзя приписывать частице такие характеристики, как положение и импульс, если нет возможности реально их наблюдать. Использование же "*частицы-сообщницы*", по мнению Бора, — просто "надувательство".

В 1965 г. опубликовала статья [15], в которой предложена более конкретная форма ЭПР-эксперимента. В нем проблема скрытых параметров рассмотрена с новой и, как показали последовавшие события, весьма плодотворной точки зрения. В ней была доказана теорема и выведено простое неравенство, известное как неравенство Белла. В работе [15] о свойствах скрытых параметров не делается никаких явных допущений, кроме одного: они должны удовлетворять принципу локальности (см. выше), тогда, как показывает Белл, результаты ЭПР-эксперимента должны удовлетворять простому неравенству. Если неравенство Белла выполняется, то предсказанию квантовой механики находится в противоречии с представлением о локальных скрытых параметрах. Если же неравенство Белла нарушается, то правы Бор и квантовая механика. С чисто экспериментальной точки зрения проблема заключалась в недоста-

точной точности аппаратуры 60-х годов. В 70-е годы в целях проверки была предложена идея измерения корреляции поляризаций двух разлетающихся фотонов [15]. В 1972 г. попытка такой проверки неравенства Белла была осуществлена [16]. Ее результаты показали нарушение неравенства Белла: подтвердили правоту Бора и правильность предсказаний квантовой механики. Далее сообщения об ЭПР-экспериментах "посыпались как из рога изобилия" [17—25]. Большинство опытов, осуществленных в 70-е годы различными группами независимых исследователей, подтвердили нарушение неравенства Белла*.

Но особенно сенсационными оказались результаты опытов, завершенных летом 1982 г. в Парижском университете [26, 27]. Экспериментаторы задались целью выяснить, в какой мере результаты измерений, производимых над одним фотоном, коррелируют с результатами измерений, проводимых над другим фотоном (оба фотона испущены одним и тем же атомом и движутся в противоположных направлениях). Им удалось убедительно подтвердить предсказание квантовой механики о более высокой степени корреляции двух частиц в "сцепленном" состоянии: между двумя разлетающимися частицами как бы существует некая сверхъестественная "телепатическая" связь. Кроме того, в [26, 27] было опровергнуто утверждение о невозможности распространения физических процессов со скоростью, большей скорости света. Ранее в [28] было установлено, что уровень корреляции между отсчетами приборов в точках A и B не зависит от расстояния между ними. Встал вопрос: каков тот реальный физический процесс, благодаря которому измерение, проводимое над частицей b прибором B , может влиять на взаимодействие частицы a с прибором A ?

Наиболее интересной оказалась попытка объяснения в рамках теории дальнего действия Уиллера-Фейнмана. В ней на равных правах используются запаздывающие и опережающие физические воздействия**. В этой схеме корреляция показаний приборов объясняется тем, что с помощью опережающих волн ("телеграф в будущее") информация от прибора B распространяется к источнику фотонов и каким-то образом влияет на их поляризацию. В таком подходе, однако, нарушается временной порядок между причиной и следствием, т. е. принцип причинности, а значит, и понимаемый достаточно узко принцип детерминизма. Тогда, в 80-е годы нарушение принципа причинности испугало некоторых советских физиков и тогдашнюю методологию науки. Вероятно, поэтому корреляционные эксперименты в СССР не проводились, так как против экспериментаторов были выдвинуты обвинения в отказе от детерминизма. Однако приведенные выше экспериментальные факты были подтверждены и позднее (в 90-х годах) опытами независимых групп исследователей разных

*** Достаточно полные обзоры приведены в [12, 13]. К сожалению, они опубликованы 20 лет назад, а здесь приходится считаться с ограничениями на текстовые размеры статьи.

**** Статья имела характерное для того времени название: "Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?" [11].

* Подчеркнем, что для опровержения принципа локальности и, следовательно, теории локальных скрытых параметров достаточно лишь одного эксперимента, в котором неравенство Белла нарушается (аналогично тому, как для опровержения закона сохранения энергии было бы достаточно построить всего один действующий экземпляр вечного двигателя).

** В отечественной литературе иногда говорят об опережающих и запаздывающих потенциалах.

стран [29—33]. С другой стороны, нарушение временного порядка между причиной и следствием нашло неожиданную поддержку в работах астрофизиков [34—36]. В них доказано, что структура некоторых областей черной дыры решающим образом зависит от будущих событий. В этих областях все происходит так, как если бы эти области черной дыры жили во времени, которое течет в противоположном направлении: из будущего в прошлое.

В связи с этим логически следует вывод о том, что квантовая телепортация осуществляется виртуальными фотонами, движущимися со сверх-световой скоростью. Вероятность движения фотонов со сверхсветовой скоростью неоднократно предсказывалась Р. Фейнманом [37]. По сути, такие фотоны становятся тахионами. Этим и объясняется мгновенная передача импульса от одного фотона к другому при условии, что фотоны находятся в сцепленном состоянии. Что же касается принципа причинности, то, действительно, для тахионов этот принцип нарушается: в нашем времени для тахионов следствие предшествует причине. Однако принцип детерминизма, если его рассматривать в широком смысле, не нарушается, так как в мире, где время течет противоположно нашему, причина во времени меняется местами со следствием, но упорядоченность сохраняется. Следовательно, выполняется и принцип детерминизма.

Здесь следует поставить вопрос о сцепленном состоянии и квантовой телепортации для электронов. Корреляционные эксперименты для электронов позволили бы выявить их неизвестные ранее свойства и характеристики. Так, при рассмотрении слабого взаимодействия электрону приписывают дополнительную сохраняющуюся величину — лептонное число. Такое же лептонное число имеет электронное нейтрино ν_e . В рамках точности современного эксперимента в соответствующих процессах взаимодействия частиц электронное лептонное число сохраняется. Это означает, что допустим, например, процесс $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, но невозможен процесс $\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p$ или процесс $\nu_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$.

До сих пор природа сохранения лептонного числа непонятна, не найдена и соответствующая симметрия, что и является предметом исследований.

Предполагается, что указанный закон сохранения является приближенным, т. е. не является строгим, но характер и степень его нарушения предстоит еще выяснить. И здесь дискретный путезависимый формализм может оказать действенную помощь. Выяснить природу сохранения лептонного заряда можно лишь тогда, когда лептонные реакции будут записаны в форме лабиринта, отображающего процесс взаимодействия, а не в форме привычных и статичных формул для реакций элементарных частиц. В этих целях предполагается создать специальную программу, в которой лептонное число для каждой лептонной реакции будет вычисляться как функция энергии, после чего может быть доказан соответствующий аналог теоремы Нётер.

Л и т е р а т у р а

1. Roth J. P. Diagnosis of automata failures: a calculus and a method// IBM Journal of Research and Development, 1966, 7. P. 18—32.
2. Правильщиков П. А. Диагностическая теория толерантности и подобия// Автоматика и телемеханика, 1992. № 10. С. 141—160.
3. Правильщиков П. А. Симметрия диагностического лабиринта и закон сохранения перебора// Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России, 1996. № 3. С. 52—68.
4. Правильщиков П. А. Закон сохранения перебора и естественный параллелизм D-алгоритмов для построения тестов и моделирования в технической диагностике (I и II)// Автоматика и телемеханика, 2004. № 7. С. 114—156.
5. Правильщиков П. А. Физическая теорема Нётер в фотонике и computer science. Ч. I// Прикладная физика. 2005. № 6. С. 144.

* Приближенными называются такие законы сохранения, которые выполняются для ограниченного класса физических систем и явлений.

6. Хиггс М., Фейнман Р. Интегралы по траекториям. — М.: Мир, 1968.
7. Mandelstam S.// Ann. Phys., 1962. V. 19. P. 1.
8. Mandelstam S.// Ibid. P. 25.
9. Менский М. Б. Группа путей: измерения, поля, частицы. — М.: Наука, 1983.
10. Правильщиков П. А. Новое "неклассическое" исчисление кубических комплексов для построения тестов и моделирования в технической диагностике// Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2003. № 4. С. 3—28.
11. Бутковский А. Г., Самоilenko Ю. И. Управление квантово-механическими процессами. — М.: Наука, 1984.
12. Сласский Б. И., Московский А. В. О нелокальности в квантовой физике// УФН, 1984, Т. 142. Вып. 4. С. 599—617.
13. Гриб А. А. Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях// Там же. С. 619—634.
14. Einstein A., Podolsky V., Rosen N.// Phys. Rev., 1935. P. 777.
15. Bell D. J.// Physics. 1965. V. 1. P. 195.
16. Clauser I. F., Horn M. A., Shimony A., Holt R. A.// Phys. Rev. Lett., 1969. V. 23. P. 880.
17. Freedman S. I., Clauser I. F.// Ibid. 1972. V. 28. P. 938.
18. Fry E. S. Thomson R. S.// Ibid. 1976. V. 37. P. 465.
19. Clauser I. F.// Ibid. 1976. V. 36. P. 1223.
20. Holt R. A., Pipkin F. A.// Preprint Harvard University. 1973.
21. Wu C. S., Shahnov I.// Phys. Rev., 1950. V. 77. P. 193.
22. Faraci G., Gutkowski S., Nottarigo S., Pennisi A. R.// Lett. Nuovo Cimento. 1974. V. 9. P. 607.
23. Kasday L. R., Ulman I. D., Wu C. S.// Nuovo Cimento. Ser. B. 1975. V. 25. P. 633.
24. Lamehi-Rachti M., Mittag W.// Phys. Rev. Ser. D. 1976. V. 14. P. 2543.
25. Aspect A., Grangier P., Roger G.// Phys. Rev. Lett., 1981. V. 47. P. 460.
26. Aspect A., Grangier P., Roger G.// Ibid. 1982. V. 49. P. 1804.
27. Aspect A., Dalibard J., Roger G.// Ibid. 1983. V. 49. P. 1804.
28. Wilson A. R., Lowe L., Butt D. K.// J. Phys. Ser. G. 1976. V. 2. P. 613.
29. Bennet C. et al.// Phys. Rev. 1993. P. 347.
30. Sudbery T. The fastest way from A to B// Nature. 1997. V. 390 /issue 6660. P. 551—553.
31. Bouwmeester D., Pan J. W., Mattle K. O., Weinfurter H., Zeilinger A. Experimental quantum teleportation// Ibid. P. 575—579.
32. Boschi D., Branca S., De Martini F. et al.// Phys. Rev., 1997. P. 154.
33. Шилейко А. Возможны ли квантовые телекоммуникации?// PCWEEK (RE), 2004. № 26 (420).
34. Торн К. С., Прайс Р. Х., Мак-Дональд Д. А. (Ред.) Черные дыры: мембранный подход. — М.: Мир, 1988: Пер. с англ. кн. Thorn K. S., Price R. H., MacDonald D. A. (Eds) Black Holes: The Membrane Paradigm. New Haven: Yale Univ. Press, 1986.

35. Новиков И. Д., Фролов В. П. Черные дыры во Вселенной/ УФН. 2001. Т. 171. № 3. С. 307.
36. Черпащук А. М. Поиски черных дыр// УФН. 2003. Т. 173. № 4. С. 345—384.

37. Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. — М.: Наука, 1968.

Статья поступила в редакцию 28 января 2005 г.

Noether "physical" theorem in photonics and computer science.

Part II

P. A. Pravilshikov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

This part of paper describes the utilization in computer science a discrete path-dependent formalism of D-algorithms, the optical Ferma principle and known "physical" Noether theorem for an inference of the enumeration conservation law which quantitative form looks like $Pr_{min} = 2N - n - m = const$. It is shown, that this law proves an opportunity of creation of new architecture of the computer with the mechanism of hyper-mass parallelism for the decision of the various equations. Brief comparison Feinman path-dependent formalism, Mandel'stam path-dependent formalism, Menkovskiy path-dependent formalism and also the discrete path-dependent formalism will be carried out from the point of view of their use as computer programs for calculations and modelling of various physical processes. The brief review of correlation experiments and their connection with of various conservation law (in particular, with the conservation law of lepton's numbers) is resulted. It is specified on an opportunity of use discrete the path-dependent formalism and the mechanism of hypermass parallelism in computing experiments for modelling processes of interactions of photons in correlation experiments and interactions of leptons.

* * *