

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Н 626

P10-87-266

Н.М.Никитюк

**ИТЕРАТИВНЫЕ КОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ
В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРАХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

1987

I. Примеры применения итеративных кодов

Простейший двумерный итеративный код использовался в различных годоскопических системах с целью экономии числа каналов регистрации. В работе [1] такой код применен в системе считывания данных, регистрируемых в многопроволочных пропорциональных камерах (МПК). Аналогичная схема кодирования использовалась при создании сцинтилляционного годоскопа [2], который включает в себя 16 сцинтилляторов и 8 ФЭУ (рис. 1). Связь между сцинтилляторами и входами ФЭУ удобно представить в виде матрицы связей H [3,4] :

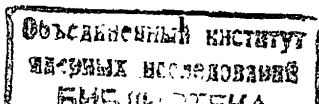
$$H = \begin{array}{c|cccccccc} & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 16 \end{array}$$

сцинтилляторы

Поскольку все столбцы матрицы H различны, то с помощью такой схемы кодирования можно однозначно регистрировать одночастичные события, в том числе и такие события, когда от одной частицы сигналы возникают от двух или трех соседних сцинтилляторов. Длина регистрируемого кластера зависит от числа единиц в строке матрицы H . В этом можно убедиться, если получить булевы суммы всевозможных соседних двух и трех столбцов матрицы H .

Схему кодирования сцинтилляционного годоскопа (или МПК) можно представить также в виде квадратной матрицы, содержащей $K^{1/2}$ строк и столько же столбцов, а сцинтилляторы рассматриваются как элементы N_{ij} матрицы. Как следствие, требуется $2K^{1/2}$ ФЭУ (или столько же усилителей-смесителей в случае МПК). Так, при $n = 16$ имеем матрицу M :

$$M = \begin{vmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{14} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{24} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} & N_{34} \\ N_{41} & N_{42} & N_{43} & N_{44} \end{vmatrix}$$



Следует отметить, что матрица типа М используется для описания итеративных кодов (см. ниже). Имея матрицу типа М, можно построить матрицу типа Н и наоборот. Из структуры матрицы типа М следует, что на ФЭУ 1 сигналы подаются от 1,2,3 и 4 сцинтилляторов, а на ФЭУ 8 – от 4,8,12 и 16 сцинтилляторов. В работах [4,5] описана более оптимальная схема кодирования сцинтилляционного годоскопа, в которой применяется двумерный итеративный код, а матрица М имеет прямоугольную форму. На рис. 2 приведена схема модуля электромагнитного калориметра, в котором плоскости, состоящие из оптических сцинтилляционных световодов, прослоены пластинами из свинца. Каждая плоскость содержит 60 световодов, а всего в модуле содержится 50 таких плоскостей. С целью более точной регистрации профиля ливня плоскость разделена на 6 равных частей по 10 световодов в каждой плоскости. Световые сигналы поступают на входы ФЭУ [6]. Нетрудно заметить, что здесь используется двумерный итеративный код с предварительным группированием световодов в плоскостях модуля.

С ростом энергии частиц все более широкое применение находят калориметры, и особенно годоскопические калориметры, с помощью которых можно определять не только энергию, но и координаты частиц [7]. Годоскопический спектрометр представляет собой матрицу из большого числа счетчиков полного поглощения, поперечный размер которых сравним с шириной электромагнитного ливня (~ 3 см). На рис. 3 в качестве примера приведена типичная матрица одного из модулей калориметра. Видно, что даже от одной распавшейся заряженной частицы сигналы могут возникнуть в шести соседних счетчиках модуля.

Возможны и более сложные события, состоящие из нескольких кластеров (рис. 4). Для регистрации таких событий в первую очередь необходимо выработать быстродействующий триггер-импульс. С этой целью в работе [8] используется специально разработанная полупроводниковая матрица, структуру которой можно описать с помощью двумерного итеративного кода. В качестве усилителей-смесителей используются сумматоры на базе операционного усилителя, работающего на частоте 1,2 ГГц.

Рассмотренные выше примеры достаточно наглядно иллюстрируют тот факт, что для сжатия информации, регистрируемой в модулях калориметров, можно эффективно использовать итеративные коды, которые описываются с помощью хорошо разработанного математического аппарата. В регистрирующей электронике для МПК нашел применение 4-мерный итеративный код. Использование двух дополнительных годоскопических плоскостей позволяет устранить неопределенности в процессе идентификации многочастичных событий, как это показано на рис. 5 [9]. Учитывая многообразие существующих итеративных кодов, ниже рассмот-



Рис. 1. Схема кодирования сцинтилляционного годоскопа с помощью итеративного кода типа ИЛИ-ИЛИ.

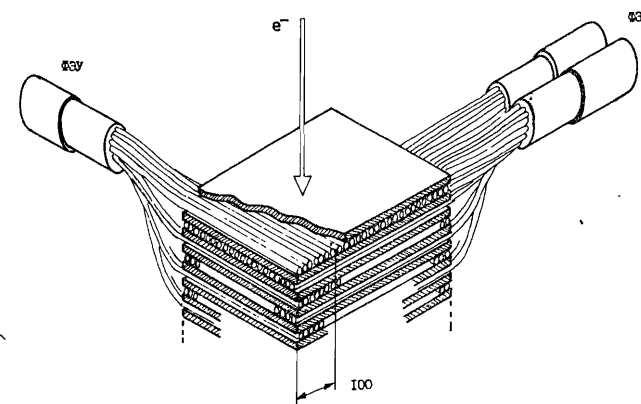


Рис. 2. Модуль сцинтилляционного калориметра, в котором используется двумерный итеративный код.

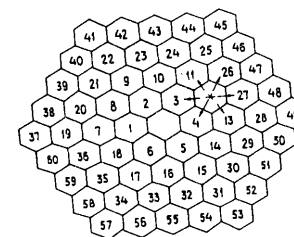


Рис. 3. Генерация кластера от распада одной частицы в модуле годоскопического калориметра. Пучок направлен перпендикулярно плоскости чертежа.

будет $n = n_1 n_2$; $m = m_1 m_2$; $K = K_1 K_2$ и $d = d_1 d_2$, где n , m и K - кодовые, информационные и проверочные символы соответственно, d - кодовое расстояние, которое определяет корректирующую способность кода. Эта величина связана с числом t исправляющих ошибок соотношением

$$t = \frac{d-1}{2}. \quad (I)$$

В нашем случае величина t - число сработавших датчиков в детекторе (сцинтилляторы, проволочки МПК и проч.).

Коды с проверками типа "ИЛИ-ИЛИ" и "Чет-Чет" являются простейшими итерационными кодами с достаточно высоким коэффициентом сжатия (отношение числа входов кодирующего устройства годоскопа к числу выходов). Однако такие коды имеют малое кодовое расстояние:

$$d = d_1 d_2 \leq 4.$$

В работе [12] было предложено объединить коды с проверками типа "ИЛИ-ИЛИ" и "Чет-Чет" и в [13] показано, каким образом такой 4-мерный итеративный код можно использовать для эффективного отбора по количеству частиц, так как сигнал "Чет" вырабатывается даже в том случае, когда на входах схемы проверки на четность сигналы отсутствуют (0 - число четное). Схема кодирования одной строки показана на рис. 7. Кодовое расстояние такого кода можно принять равным двенадцати, это значит, что имеется возможность регистрировать координаты пяти событий, за исключением симметричных относительно диагонали (рис. 5). Для устранения таких неопределенностей необходимо ввести еще две диагональные проверки.

Вопрос о регистрации кластеров таким кодом требует специального моделирования при наличии конкретных данных о детекторах и условиях эксперимента. На рис. 8 в качестве примера приведено сложное событие, зарегистрированное в детекторе, содержащем 1296 датчиков. Датчики представлены в виде матрицы, состоящей из 36 столбцов и столько же строк. Синдром этого итеративного кода имеет 128 разрядов, и его эффективность растет с числом K . Так, при $K=32$ $K_c = 1296/128 = 10$, при $K=64$ $K_c = 17$, где K_c - коэффициент сжатия.

Рассмотрим кратко алгоритм распознавания события, изображенного на рис. 8. Совпадение сигналов "Чет" и "ИЛИ" в 1-й и 2-й строках и в 6-й и 7-м столбце однозначно указывает, что импульсы поступили от 6, 7, 42 и 43 датчиков. Также однозначно регистрируются сигналы, поступившие от датчиков 752+755. Аналогично идентифицируются координаты частиц, прошедших через датчики 371+373 и 1272-1275.

3. Более мощные итеративные коды

Из выражения (I) непосредственно следует, что для регистрации

многочастичных событий необходимо использовать для итерации коды с большим кодовым расстоянием. В работах [14-15] была предложена схема кодирования, в которой проверки по строкам выполнены в соответствии с популярным модифицированным кодом Хэмминга $d = 4$, а проверки по столбцам организованы просто по схеме ИЛИ ($d = 2$).

Применение кода Хэмминга для построения параллельного шифратора подробно изложено в работе [3]. Для получения проверок по строке при $K=32$ требуется 6 разрядов. Тогда при $n=1296$ требуется $32 \times 6 = 192$ бит для проверок по строкам и 32 бит для проверок по столбцам. Основные параметры кода $K_c = 1296/224 = 6$ и $d = 8$. Уменьшение величины K_c по сравнению с 4-мерным итеративным кодом окупается тем, что кодирование по схеме "модифицированный код Хэмминга - ИЛИ" позволяет однозначно идентифицировать симметричные относительно диагонали события, подобно тем, которое изображено на рис. 5, поскольку с помощью кода Хэмминга можно регистрировать координаты однократной ошибки. Более того, используя модифицированный код Хэмминга, можно регистрировать координаты двойных кластеров.

Код Хэмминга представляет также интерес еще и потому, что в настоящее время промышленностью выпускаются специальные микросхемы для получения синдрома. Поэтому имеет смысл рассмотреть свойства итеративного кода, в котором для получения проверок как по строкам, так и по столбцам используется модифицированный код Хэмминга (кратко: код Хэмминг-Хэмминг). У такого кода $d=16$ и $t = \frac{16-1}{2} = 7$. Кроме того, код Хэмминг-Хэмминг может регистрировать кластеры длины $K-1$. На рис. 9 и 10 приведены всевозможные образцы двумерных матриц с весом $1+4$. За пределами рамок приведены суммы весов, которые могут быть зарегистрированы с помощью итеративного кода Хэмминг-Хэмминг. Так, если в какой-либо строке или столбце было три сигнала, то они идентифицируются как один, четыре - как 2. На рис. 9 и 10 не показаны симметричные события.

Применительно к регистрации данных в годоскопических системах параметры применяемого кода нередко определяются заданной верхней величиной множественности. Анализ показывает, что модифицированный код Хэмминг-Хэмминг имеет следующие возможности:

- может регистрировать любые 3 координаты;
- определяет координаты 4-х событий при условии, что не может сработать более 11 датчиков, так как есть совпадение синдромов при $t = 4$ и $t = 12$;
- позволяет регистрировать координаты 5 сигналов, если заведомо известно, что не может сработать более 10 датчиков, так как имеются

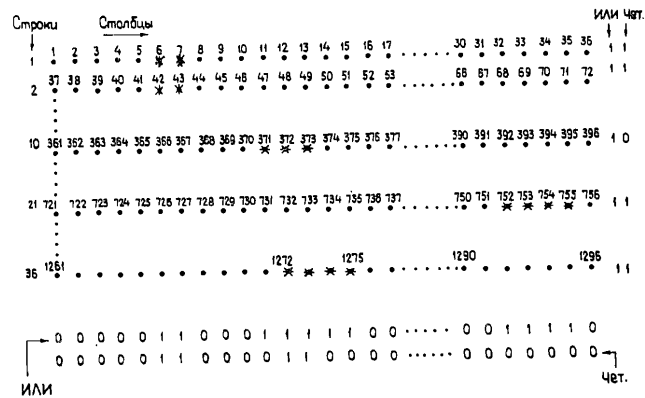


Рис. 8. Пример сложного события, распознаваемого с помощью итеративного кода "Чет-ИЛИ".

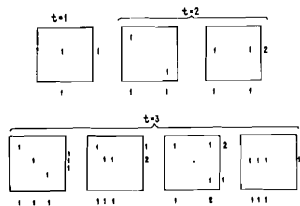


Рис. 9. Всевозможные конфигурации событий в двумерной плоскости при $t = 1, 2$ и 3 .

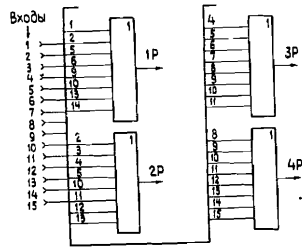


Рис. 11. Схема вычисления синдрома для одной строки в случае применения итеративного кода Грей-ИЛИ.

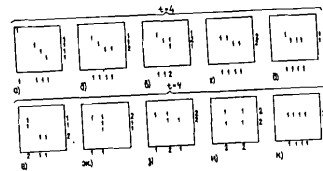


Рис. 10. Всевозможные конфигурации событий в двумерной плоскости при $t = 4$.

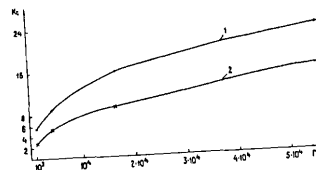


Рис. 12. Кривые роста эффективности итеративных кодов в зависимости от числа каналов регистрации. 1 - код Грей-ИЛИ, 2 - код Грей-Грей.

совпадения некоторых кодовых слов синдрома при $t=5$ и $t=11$;
 - может регистрировать координаты 6, 7 и 8 сработавших датчиков, если заведомо известно, что не могут сработать больше 9 и 8 датчиков.

4. Суперпозиционные итеративные коды

Полезные свойства суперпозиционных кодов с целью кодирования данных в спинтиляционных годоскопах и модулях калориметров были отмечены в работах [3+5]. Такие коды, имея меньшее кодовое расстояние, при прочих равных параметрах имеют то полезное качество, что синдром кода формируется не с помощью сумматоров по модулю два, а путем суммирования сигналов на смесителях. Причем в качестве смесителей можно использовать как дискретные элементы, так и аналоговые, например ФЭУ. Практически это значит, что кодирование можно осуществлять до усиления сигналов.

Рассмотренный выше код с проверками типа "ИЛИ-ИЛИ" является суперпозиционным. Как было показано в [3], обычный код Хэмминга (без дополнительной проверки) и код Грея являются суперпозиционными кодами. Поэтому итерация таких кодов по схеме Хэмминг-ИЛИ и Грей-ИЛИ является также суперпозиционным итеративным кодом.

Рассмотрим пример построения кодирующего устройства для итеративного кода Грей-ИЛИ. Допустим, что $N=225$, тогда $K=15$. Допустим, что проверки по строкам выполняются в соответствии с кодом Грея, а по столбцам - по схеме ИЛИ. Поскольку все строки кодируются одинаково, то проверочные соотношения по всем 15 строкам выполняются в соответствии с матрицей проверочных соотношений 4-значного кода Грея:

$$H_2 = \begin{array}{c|cccc|c} & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & & \text{Смесители} \\ & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & & 2 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 3 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & & 4 \\ \text{Датчики} \rightarrow & 1 & 2 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 15 & \end{array}$$

Схема кодирующего годоскопа (шифратор в коде Грея) для одной строки приведена на рис. 11. С учетом проверок по столбцам по схеме ИЛИ требуется $15 \cdot 4 \cdot 15 = 75$ смесителей, так как для кодирования каждой строки требуется шифратор в коде Грея, состоящий из 4-х усилителей-смесителей. Кодовое расстояние такого итерационного кода $d = d_1 d_2 \approx 2 \cdot 4 \approx 8$ или меньше.

5. Выводы

Из ряда примеров, приведенных выше, следует, что простейшие итеративные коды используются для сжатия данных, регистрируемых в сцинтилляционных годоскопах, в МПК и калориметрах. Практически это значит, что для распознавания событий, имеющих сложную топологию, можно использовать хорошо разработанный математический аппарат теории кодирования.

С учетом многообразия физических экспериментов, используемых в них детекторов и широкого диапазона энергий частиц, возникает вопрос, какие исходные коды следует выбирать для построения кодирующего устройства? Однозначно ответить на этот вопрос довольно трудно, так как известно множество различных типов кодов (см., например, [10]). Поэтому задачу построения оптимального кодирующего устройства лучше начинать с постановки задачи, где главными критериями должны быть быстродействие, возможная верхняя граница регистрируемой множественности t и число каналов регистрации n . Исходя из общих соображений, можно сказать, что если величина t невелика ($t < 10$), то можно использовать итерацию кодов с проверками типа ИЛИ-ИЛИ, Хэмминг-ИЛИ, Грэй-ИЛИ и прочее.

В тех случаях, когда величина $t > 10$, а число каналов регистрации n превышает 1000, можно рекомендовать в качестве исходных для итерации широкий класс циклических кодов, имеющих большую величину t (свыше 10). Такие коды [16] в данной работе не рассматривались и их применение в ядерной электронике требует дальнейшего изучения. Следует отметить, что эффективность применения итеративного кода существенно растет с ростом числа каналов регистрации. На рис. 12 приведены две кривые, характеризующие увеличение коэффициента сжатия двух итеративных кодов: кривая 1 соответствует итерации кодов Грэй-ИЛИ, а кривая 2 - итерации кодов Грэй-Грэй. При очень больших числах каналов ($n > 10^5$) эти кривые практически сходятся. Практически - это значит, что при больших числах n следует применять более мощные итеративные коды.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Bonozzola G.C. et al. A coding system for multiwire proportional chambers. In: Proc. Intern. Conf. of Instr. for High Energy Phys. JINR, D-5805, Dubna, 1975, p.265.
2. Bressani T. et al. CERN Preprint, CERN-EP3/83-151, Geneva, 1983.

3. Никитюк Н.М. Вопросы оптимального кодирования в годоскопических системах. ПТЭ, 1983, № 3, с.74.
4. Никитюк Н.М. Оптимальное кодирование в сцинтилляционных годоскопах. ОИЯИ, Р10-85-364, Дубна, 1985.
5. Никитюк Н.М. Сцинтилляционный годоскоп. Авт.свид. № 1088506. Бюллетень ОИ, 1985, № 47, с. 274.
6. Burmeister H., Sonderegger P., Gago J.M. Electromagnetic Calorimetry using scintillating plastic fibers. CERN Preprint, Ep/83-136, Geneva, 1983.
7. Прокошкин Ю.Д. Годоскопические калориметры как базовые детекторы для измерения координат и энергий частиц в экспериментах в IO-ТэВной области. Препринт ИФВЭ, № 79-148, Серпухов, 1979.
8. Nelson K.S., Erwin A.R. A fast cross matrix for adding analogue signals in a calorimeter IEEE Transaction on Nucl.Sciens, 1983, vol. NS-30, No. 1. p.146.
9. Miyamoto S. A digitized multi-wire spark chamber for handling many particles. Nucl. Instrum. and Meth., 1964, vol.30, N 2, p.361.
10. Бородин Л.Ф. Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. Советское радио, М., 1968, с. 246.
11. Никитюк Н.М. Метод синдромного кодирования и его применение для быстрого аппаратного отбора событий на основе процессоров, оперирующих в поле Галуа $GF(2^m)$. Препринт ОИЯИ, Р11-80-484, Дубна, 1980.
12. Никитюк Н.М. Устройство считывания информации с координатной камеры. Авт.свид. № 1072618. Бюллетень ОИ, 1984, № 45, с.209.
13. Никитюк Н.М. Метод регистрации множественности в годоскопических системах с большим числом каналов регистрации. Препринт ОИЯИ, Р10-86-73, Дубна, 1986.
14. Nikitjuk N.M., Radzhabov R.S., Shafranov M.D. Nucl. Instrum. and Meth., 1974, vol.115, p.76.
15. Никитюк Н.М., Раджабов Р.С., Шафранов М.Д. Устройство для считывания данных с координатных пропорциональных камер. Авт.свид. № 705480. Бюллетень ОИ, 1979, № 47, с.224.
16. Lalit R.V., Chien R.T. Single and multiple-burst-correcting properties of a class cyclic product codrs. IEEE Transaction on Information Theory, 1971, vol.IT-17, No 5, p.594.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 апреля 1987 года.