объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Р11-81-784

Н.М.Никитюк

ВОПРОСЫ ОПТИМАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ ДАННЫХ В ГОДОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Направлено в ПТЭ

1981

1. ВВЕДЕНИЕ

Кодирование информации в годоскопических системах имеет целью сокращение каналов считывания данных и представление их в форме, удобной для выполнения над ними различного рода операций, так как сигналы от детекторов заряженных частиц, как правило, поступают в виде унитарного кода. Проблемы оптимального кодирования возникают также в связи с тем, что эти сигналы имеют различную физическую природу. Например, сигналы, поступающие от сцинтилляторов, электрически нейтральны, и поэтому кодирование данных в сцинтилляционных годоскопах можно выполнять до прохождения ими ФЭУ с помощью гибких световодов, в то время как сигналы, поступающие с проволочек МПК, нуждаются в предварительном усилении, и только после этого возможно их надежное кодирование. В дальнейшем, в процессе изложения источники сигналов /проволочки МПК, сцинтилляторы и проч./ будем называть датчиками. В настоящее время основным устройством кодирования данных в годоскопических системах является приоритетный шифратор. Это устройство является универсальным, так как позволяет производить кодирование сигналов с произвольного числа (t) одновременно сработавших датчиков. Однако эта универсальность достигается за счет увеличения времени преобразования, так как кодирование выполняется параллельно-последовательным способом. Поэтому в тех случаях, когда прежде всего требуется высокое быстродействие, применяются параллельные шифраторы, у которых данные на выходе появляются лишь по истечении времени T,которое зависит только от задержки сигналов в логических схемах.

В качестве примера можно назвать широко известное устройство для преобразования унитарного кода в обыкновенный двоичный код, у которого число выходов $N = \log_2 n$, где n - число входов. Однако при $t > 1$ такой шифратор не работоспособен. Более того, даже при $t = 1$, когда частица проходит под углом к плоскости сцинтилляторов, на их стыке может возникнуть недопустимая ошибка в определении координаты. Поэтому в таких годоскопах широкое применение находит код Грея /1-3/,который, так же, как и обыкновенный двоичный код, оптимален. Однако применение кода Грея обеспечивает однозначное определение координаты только одной частицы. Поэтому практический интерес представляют такие коды, с помощью которых можно было бы параллельно шифровать информацию с t одновременно сработавших датчиков. Для таких шифраторов в лучшем случае должно выполняться условие $N=t\log_2 n$. При этом предполагается, что $t \ll n$. В противном случае их применение нецелесообразно. На практике это условие, как правило, выполняется.

Как показано в работе [4], для построения параллельных шифраторов можно использовать теорию кодирования, которая базируется на хорошо разработанном математическом аппарате. Имеет смысл использовать эту теорию для оптимального кодирования данных в годоскопических системах. Суть проблемы заключается в том, что в настоящее время в теории кодирования выделяются три раздела [5]: теория алгебраических кодов, теория сверточных кодов и теория кодов, используемых в арифметических устройствах. И хотя эти разделы тесно связаны друг с другом, они в то же время характеризуются каждый собственным подходом к проблеме кодирования. Поэтому возникает вопрос: какой раздел теории кодирования является наиболее подходящим для оптимального кодирования данных, поступающих от детекторов заряженных частиц? В наших работах основное внимание уделяется алгебраической теории кодирования, которая в настоящее время хорошо разработана [6,7]. Однако в этой теории рассматривается структура и способы построения множества различных кодов, в связи с этим возникает второй вопрос: на какой из этих кодов следует обратить внимание прежде всего? Частично ответ на этот вопрос нами был дан в работах, где показана возможность применения теории БЧХ-кодов для сжатия данных и определения координат событий [8,9]. Следует отметить, что различного рода коды при создании координатных детекторов заряженных частиц в ядерной электронике использовались на практике не менее двадцати лет. Пожалуй, наиболее ранней из разработок в этой области следует считать сцинтилляционный годоскоп Альвареца, в котором используется код Грея с целью уменьшения числа ФЭУ и разрешения неопределенностей при прохождении частицы на стыке сцинтилляторов под углом к их плоскости [1]. Определенную пользу может принести изучение вопроса применения различного рода кодов в годоскопических системах и современное состояние шифрации данных в таких системах.

Следует отметить, что в той или иной степени методы теории алгебраического кодирования /возможно, в неявном виде/ применялись в ядерной электронике и в детекторах заряженных частиц. Одна из ранних работ [17] посвящена созданию сцинтилляционного годоскопа со световой кодировкой с целью уменьшения общего числа ФЭУ при регистрации одночастичных событий.

В работах [11,12] показана возможность применения информационной избыточности чисел Фибаначи в электронных устройствах автоматов на ЭЛТ для контроля линейности выходных характеристик преобразователей информации. Несомненный интерес представляют работы Л.М.Сороко/13,14/, в которых используется код Адамара для снижения ошибки измерения фона в сцинтилляционных счетчиках частиц и для построения мультиплексных систем регистрации частиц. Другие, аналогичные примеры будут рассмотрены ниже.

Цель данной работы состоит в том, чтобы показать, что между алгебраической теорией кодирования и вопросами оптимального кодирования данных в годоскопических устройствах существует система аналогий, с помощью которой можно создавать кодирующие устройства /параллельные шифраторы/ с заданными свойствами.

2. СИСТЕМА АНАЛОГИЙ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КОДИРОВАНИЯ И ТЕОРИИ ГОДОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С целью более эффективного применения алгебраической теории кодирования к годоскопическим системам имеет смысл рассмотреть основные понятия и параметры, используемые в алгебраической теории кодирования и поставить их в соответствие определенным параметрам годоскопических систем. В таблице приведена предлагаемая система аналогий, которая более детально рассматривается ниже.

1. Блоковый код - это код, в котором используется последовательность из n символов. Кодовый вектор блокового кода состоит из k информационных и $m=n-k$ избыточных контрольных разрядов. Вектор, состоящий из одних нулей, называется нулевым вектором. Нулевому вектору соответствует нулевое слово, считываемое с детектора или с годоскопической системы в том случае, когда нет сработавших датчиков.

2. В процессе передачи данных по каналу к кодовому вектору может добавиться вектор ошибок e. Этому вектору в теории годоскопических систем соответствует физическое событие, в результате регистрации которого с датчиков поступают сигналы по каналам считывания.

3. Пакету ошибок в каналах передачи соответствует кластер, который возникает в результате срабатывания группы соседних датчиков. Поэтому теория кодов, исправляющих пакеты ошибок, может быть применена для построения устройств, способных регистрировать координаты кластеров.

4. Параметр t есть то количество искаженных информационных символов, которое может исправляться данным кодом.

В теории годоскопических систем величина t определяет максимальное число сработавших датчиков, координаты которых однозначно определяются параллельным шифратором.

Таблица

Теория кодирования	Теория годоскопических систем
1. Кодовый вектор блокового кода, состоящий из n символов.	Кодовое слово, считываемое с n датчиков.
2. Вектор ошибки e.	Физическое событие, зарегистрированное в многоканальном детекторе.
3. Пакет ошибок.	Кластер.
4. Корректирующая способность кода t.	Количество одновременно сработавших датчиков t, координаты которых однозначно шифрируются.
5. Число проверочных символов кодового слова $N=mt$.	Число разрядов на выходе параллельного шифратора.
6. Эффективность кода.	Коэффициент сжатия K_c.
7. Кодирующее устройство.	Параллельный шифратор.
8. Проверочная матрица.	Матрица связей.
9. Кодовое расстояние d.	Кодовое расстояние d.
10. Вес кодового вектора w.	Вес строки матрицы связей w.
11. Вес столбца проверочной матрицы b.	Коэффициент разветвления сигнала датчика K_p.
12. Полностью асимметричный канал.	Каналы передачи данных в годоскопической системе.
13. Двумерный итеративный код.	Кодирование данных в двумерном годоскопе.

5. Важным параметром кода является число проверочных символов N /синдром кода/. Эта величина зависит как от блоковой длины кода, так и от параметра t. Так, если взять широко известный код Хемминга, в котором $t=1$, то блоковая длина $n=2^m-1$, а число информационных символов $k=n-m=2^m-1-m$. Если же величина $t>1$, то число проверочных символов $N=mt$.

6. Эффективность кода /скорость передачи/ v определяется из отношения $v=k/n$. В годоскопических системах этому параметру соответствует коэффициент сжатия K_c : $K_c=n/N$. Это один из важнейших параметров годоскопа, так как он характеризует степень сжатия данных.

7. Кодирующее устройство служит для формирования проверочных символов на передающей стороне устройства. В годоскопических системах аналогом кодирующего устройства может служить параллельный шифратор. В сцинтилляционных годоскопах кодирование может выполняться до усилителей, например путем соответствующих связей при помощи световодов между сцинтилляторами и ФЭУ.

8. Структура кодирующего устройства задается проверочной матрицей, состоящей из нулей и единиц и содержащей N строк и n столбцов. Примеры таких матриц приведены в следующем разделе, где показано, что для построения параллельных шифраторов с заданными свойствами можно использовать соответствующие проверочные матрицы, которые применительно к годоскопическим системам мы будем называть матрицами связей. По матрицам связей можно определять основные параметры параллельных шифраторов и их логическую структуру. Все столбцы матрицы связей различны.

8. Важным параметром в теории кодирования является кодовое расстояние d. Для двоичного кода расстояние между двумя кодовыми векторами равно числу единиц в сумме этих векторов по модулю два, например,

$$+\begin{array}{r} 1110110 \\ \underline{0101010} \\ 1011100 \end{array} \mod 2,$$

т.е. это расстояние равно четырем. Если поменять местами в кодовом векторе единицу и нуль, то величина d изменится на две единицы. Так, если поменять местами два крайних разряда справа в первом слагаемом, получим:

$$+\begin{array}{r} 1110101 \\ \underline{0101010} \\ 1011111 \end{array} \mod 2.$$

Это свойство кодового расстояния может быть использовано при построении шифраторов для определения координат кластеров /см. ниже матрицы связей H_1 и H_2 /. Следует отметить, что кодовое расстояние d связано с параметром t следующим простым соотношением:

$$t = \frac{d-1}{2}.$$

Смысл этого выражения состоит в том, что если мы хотим построить код, исправляющий одну ошибку, необходимо, чтобы минимальное кодовое расстояние, взятое по всем парам кодовых слов, было не меньше чем 3. Параметром d мы будем пользоваться также в теории годоскопических систем.

10. Вес кодового вектора w определяется как число ненулевых компонент этого вектора. Количество единиц в строке проверочной матрицы так же, как и в строке матрицы связей, характеризует сложность реализации кодирующих устройств.

11. Вес столбца проверочной матрицы и матрицы связей также имеет отношение к сложности реализации кодирующего устройства и параллельного шифратора. Вес столбца матрицы связей определяет коэффициент развётвления сигнала K_c. Чем меньше эта величина, тем проще связи между датчиками и логическими элементами и усилителями параллельного шифратора.

12. Полностью асимметричным является канал, в котором имеет место только один вид ошибок, т.е. возможно либо только преобразование нулей в единицы, либо, наоборот, только единиц в нули. В этом смысле каналы считывания данных в годоскопических системах являются чисто асимметричными. Необходимость введения такой аналогии диктуется тем, что для асимметричных каналов имеется ряд кодов с хорошими параметрами и такие коды легко реализуются.

13. Двумерный итеративный код используется для оптимального кодирования данных как в сцинтилляционных годоскопах [17], так и в МПК [18] при регистрации одночастичных событий. При таком способе кодирования n источников сигналов располагаются в виде квадратной матрицы, содержащей K строк и K столбцов, и вычисляются проверочные соотношения /синдром/ по строкам и столбцам. В результате число усилителей сигналов /или ФЭУ/ уменьшается в $2\sqrt{n}$ раз.

3. ПАРАМЕТРЫ ПРОСТЕЙШИХ МАТРИЦ СВЯЗЕЙ

Рассмотрим проверочную матрицу H_1 для двоичного кода Хемминга с параметрами $n=15$, $k=11$, $m=4$ и $t=1$.

$$
H_1 = \begin{array}{ccccccccccccccccc}
1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & N_1 \\
0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & N_2 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & N_3 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & N_4 \\
n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & n_6 & n_7 & n_8 & n_9 & n_{10} & n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} &
\end{array}
$$

Входы

Здесь кодовое расстояние $d=3$, поэтому этот код позволяет исправлять любую одиночную ошибку при передаче кодового слова по каналу. В нашу задачу не входит описание того, как выполняется кодирование и декодирование кодового вектора. Эти вопросы детально рассматриваются в известных книгах по теории кодирования [5–7]. Пользуясь системой аналогий, приведенной в таблице,можно установить, что матрица H_1 одновременно представляет собой матрицу связей, с помощью которой нетрудно построить схему обыкновенного двоичного шифратора, имеющего 15 входов и 4 выхода. В общем виде матрица типа H_1 строится просто: ее столбцы представляют собой упорядоченную последовательность двоичных чисел, хотя в принципе она не является обязательной, как это показано ниже при рассмотрении матрицы H_2.

Если каждому столбцу матрицы H_1 поставить в соответствие один датчик, то можно получить систему из 4 уравнений,с помощью которых можно выполнить связи выходов датчиков со входами логических элементов параллельного шифратора.

$$
\begin{aligned}
&- \quad N_1 = n_1 + n_3 + n_5 + n_7 + n_9 + n_{11} + n_{13} + n_{15}, \\
&- \quad N_2 = n_2 + n_3 + n_6 + n_7 + n_{10} + n_{11} + n_{14} + n_{15}, \qquad /1/ \\
&- \quad N_3 = n_5 + n_6 + n_4 + n_7 + n_{12} + n_{13} + n_{14} + n_{15}, \\
&- \quad N_4 = n_8 + n_9 + n_{10} + n_{11} + n_{12} + n_{13} + n_{14} + n_{15}.
\end{aligned}
$$

Допустим, что сигнал поступил от датчика n_{10}. Тогда из равенства /1/ имеем: $N_1=0$, $N_2=1$, $N_3=0$ и $N_4=1$,что соответствует цифре 10_2 / N_1 - младший разряд/. Теперь допустим, что одновременно поступают сигналы от датчиков n_1 и n_2 ,тогда получим $N_1=N_2=1$ и $N_3=N_4=0$, что соответствует 3_2. Другими словами, сумма по модулю 2 первого и второго столбца матрицы H_1 равна третьему. Тем самым подтверждается тот факт, что двоичный шифратор работает верно только при появлении одного сигнала на его входах. Обращаясь снова к таблице и к матрице H_1, можно сделать следующие выводы. Вес каждой из строк матрицы H_1 равен восьми, коэффициент разветвления сигнала K_p не постоянен и находится в пределах 1-4. Причем сигнал от первого датчика не разветвляется, а от 15-го разветвляется на четыре. Количество разрядов синдрома N равно четырем и равно коэффициенту сжатия K_c .Следует сделать еще одно важное замечание, которое касается двоичного кода Хемминга: свойства матрицы H_1 не изменятся, если в уравнениях /1/ операцию суммирования по модулю 2 заменить на операцию булевой суммы. Аналогичное замечание относится и к коду Грея, что позволяет производить кодирование данных в сцинтилляционных годоскопах до прохождения ими ФЭУ, при помощи связи сцинтилляторов и ФЭУ гибкими световодами. Если использовать код Грея, то матрица связей будет иметь вид:

$$
H_2 = \begin{matrix}
1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1
\end{matrix}
$$

Матрица H_2 отличается от матрицы H_1 лишь перестановкой столбцов таким образом, что эти столбцы представляют 4-значные элементы кода Грея [2,15]. С теоретической точки зрения минимальное кодовое расстояние в коде Грея больше, чем в обычном двоичном коде Хемминга. Это преимущество достигнуто только благодаря более рациональному расположению столбцов матрицы H_1, что привело к увеличению кодового расстояния. Так, если в матрице H_1 булева сумма двух соседних столбцов $n_{11} \vee n_{12} = n_{15}$, то в матрице H_2 булева сумма любых двух столбцов равна одному из слагаемых. Таким образом, если в сцинтилляционном годоскопе используется код Грея, то регистрация координаты частицы, проходящей под углом к плоскости сцинтилляторов на их стыке, происходит более точно, чем в случае использования обычного двоичного кода. Однако имеет место совпадение таких булевых сумм, как $n_1 \vee n_2$ и $n_2 \vee n_3$, $n_4 \vee n_5$ и $n_5 \vee n_6$, $n_9 \vee n_{10}$ n и $n_{10} \vee n_{11}$, $n_{12} \vee n_{13}$ и $n_{13} \vee n_{14}$, что приводит к ухудшению пространственного разрешения координат в этих позициях по сравнению с другими. Для разрешения этих неопределенностей можно ввести еще одну строку в матрицу H_2. Рассмотрим несколько примеров. На рисунке приведена схема кодирования 16-элементного годоскопа, разработанного Альварецем [1]. На этом рисунке затушеванные полоски изображают сцинтилляторы, а незатушеванные - световоды. Нетрудно заметить, что расположение сцинтилляционных полос на рис.1а соответствует позициям единиц в матрице H_2. Видно, что две частицы, входящие в годоскоп под разными углами, имеют одинаковое кодовое значение. Однако различить такие комбинации с помощью электроники невозможно. В годоскопе Альвареца кодирование выполняется путем создания объемной маски из сицнтилляторов и световодов. Здесь сцинтилляторы соприкасаются непосредственно с ФЭУ, и поэтому коэффициент разветвления сигнала $K_p = 1$. Применение находят также конструкции сцинтилляционных годоскопов, в которых сцинтилляторы выполнены в виде идентичных полосок, а связи сцинтилляторов с ФЭУ осуществляются при помощи гибких световодов [16]. На рис.1б приведена схема годоскопа, у которого связи сцинтилляторов с ФЭУ при помощи световодов

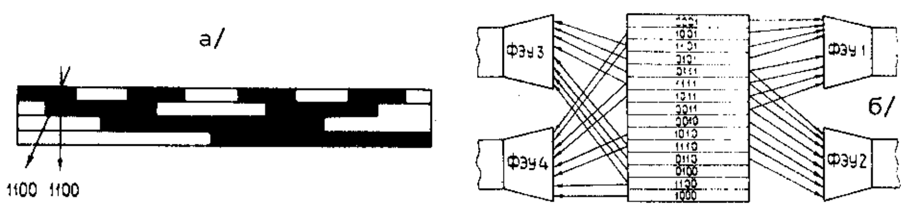

Схема кодирования в сцинтилляционном годоскопе Альвареца в соответствии с кодом Грея. а/ Способ кодирования с помощью объемной маски, б/ способ кодирования с помощью световодов.

выполнены в соответствии с матрицей связей H_2. Такая конструкция годоскопа требует разветвления сигнала, и максимальное значение этого разветвления в нашем примере равно 4. Здесь стрелками условно показаны световоды.

4. ПРИМЕРЫ МАТРИЦ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ КООРДИНАТ КЛАСТЕРОВ

При решении ряда частных задач, связанных с обнаружением или регистрацией только координат кластеров определенной длины, можно применить, как это мы уже отмечали выше, теорию кодов, исправляющих пакеты ошибок. Из этой теории следует, что для обнаружения кодом длины n всех пакетов ошибок длины b или меньше необходимо и достаточно b проверочных символов, а для исправления всех пакетов ошибок длины b или меньше линейный код должен иметь по крайней мере $2b$ проверочных символов. В качестве примера рассмотрим матрицу связей H_3, с помощью которой можно реализовать схему параллельного шифратора для обнаружения кластеров длиной 5 и меньше:

$$H_3 = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Длину кластера можно определить по весу суммарного столбца, причем поразрядное суммирование можно выполнять по схеме ИЛИ. Параметр K_c для этой матрицы равен 4. Нетрудно заметить, что матрица H_3 имеет регулярную структуру. Следующий пример показывает, каким образом можно построить матрицу связей для регистрации координат тройных кластеров и меньше.

Рассмотрим матрицу H_4 :

$$H_4 = \begin{vmatrix} 1 & X & X^2 & \ldots X^{14} & \ldots X^{90} & \ldots X^{104} \\ 1 & Y & Y^2 & \ldots Y^{14} & \ldots Y^{90} & \ldots Y^{104} \\ 1 & Z & Z^2 & \ldots Z^{14} & \ldots Z^{90} & \ldots Z^{104} \end{vmatrix},$$

Каждый столбец этой матрицы состоит из трех элементов полей Галуа: $GF(2^4)$, $CF(2^3)$ и $CF(2^2)$, которые образованы над неприводимыми многочленами X^4+X+1, Y^3+Y+1 и Z^2+Z+1 соответственно /21/. Поле Галуа $GF(2^4)$ содержит 15 ненулевых элементов: $X^0=1=100$, $X=0100$, $X^2=0010$, $X^3=0001$, $X^4=1100$, $X^5=0110$, $X^6==0011$, $X^7=1101$, $X^8=1010$, $X^9=0101$, $X^{10}=1110$, $X^{11}=0111$, $X^{12}=1111$, $X^{13}=1011$, $X^{14}=1001$. Причем $X^{90}=X^{15\times 6}=X^0$ и $X^{104}=X^{15\times 6+14}=X^{14}$ в силу цикличности поля. Поле Галуа $GF(2^3)$

состоит из семи элементов: $Y^0=1=100$, $Y^1=010$, $Y^2=001$, $Y^3=110$, $Y^4=011$, $Y^5=111$, $Y^6=101$. Причем $Y^{14}=Y^{7\times 2}=Y^0$, $Y^{90}=Y^{7\times 12+6}=Y^6$ и $Y^{104}=Y^6$. И, наконец, поле Галуа $GF(2^2)$ включает три элемента: $Z^0=10$, $Z^1=01$ и $Z^2=11$, $Z^{14}=Z^{3\times 4+2}=Z^2$, $Z^{90}=Z^{3\times 30}=Z^0$, $Z^{104}=Z^2$. Если теперь в матрице H_4 заменить элементы полей Галуа на их двоичные эквиваленты и расположить их по вертикали, то получим матрицу связей H_5, состоящую из 104 столбцов и 9 строк, у которой суммы по модулю 2 всевозможных трех соседних столбцов, так же как и аналогичные суммы по модулю 2 двух соседних столбцов, не совпадают как между собой, так и со столбцами матрицы H_5:

$$H_5=\begin{array}{cccccccccc}
1 & 0 & 0 & \ldots & 1 & \ldots & 1 & \ldots & 1 \\
0 & 1 & 0 & \ldots & 0 & \ldots & 0 & \ldots & 0 \\
0 & 0 & 1 & \ldots & 0 & \ldots & 0 & \ldots & 0 \\
0 & 0 & 0 & \ldots & 1 & \ldots & 0 & \ldots & 1 \\
1 & 0 & 0 & \ldots & 0 & \ldots & 1 & \ldots & 0 \\
0 & 1 & 0 & \ldots & 1 & \ldots & 1 & \ldots & 1 \\
0 & 0 & 1 & \ldots & 0 & \ldots & 1 & \ldots & 0 \\
1 & 0 & 1 & \ldots & 1 & \ldots & 1 & \ldots & 1 \\
0 & 1 & 1 & \ldots & 1 & \ldots & 0 & \ldots & 1
\end{array}$$

Коэффициент сжатия $K_c=104/9\approx 11$. Если бы мы задавались целью построить матрицу связей для регистрации трех независимых срабатываний датчиков или одного тройного кластера в соответствии с теорией БЧХ-кодов [9], то коэффициент сжатия составил бы $K_c=\dfrac{2^7}{3\times 7}\simeq 6$.

Другие способы построения матриц связей для регистрации кластеров больших размеров можно получить, используя порождающие полиномы [22].

В заключение рассмотрим матрицу связей H_6, с помощью которой можно описать схему кодирования, используемую в сцинтилляционном годоскопе [17]. Аналогичный способ кодирования применен в работе [18] в устройстве считывания данных, поступающих от проволочек МПК. При $n=16$ матрица связей H_6 имеет вид:

$$H_6=\begin{array}{cccccccccccccccc|c}
1&1&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&1\\
0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&2\\
0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&3\\
0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&1&1&4\\
1&0&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&5\\
0&1&0&1&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&6\\
0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&1&0&1&0&7\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&1&0&1&0&1&8\\
\hline
1&2&3&4&5&6&7&8&9&10&11&12&13&14&15&16&
\end{array}$$

Номера ФЭУ

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 → номера сцинтилляторов

Коэффициент разветвления сигнала $K_p=2$, а коэффициент сжатия $K_c=n/2\sqrt{n}=2$, и эта последняя величина растет с увеличением n. Так, при $n=1024$ $K_c=16$. Нетрудно проверить, что если мы сравним между собой булевы суммы двух соседних столбцов матрицы H_6, то увидим, что они различны и отличаются от столбцов исходной матрицы. Таким образом, кодирование в сцинтилляционном годоскопе в соответствии с матрицей H_6 гарантирует регистрацию координаты двойного кластера. Однако применение кода Грея, как это следует из матрицы H_2, дает большую экономию ФЭУ, но конструкция годоскопа при этом усложняется. Схема кодирования в соответствии с матрицей H_6 позволяет, как это нетрудно проверить с точностью до единицы сцинтиллятора, регистрировать координаты тройных кластеров. Более высокую точность дает схема кодирования, принятая в работе /18/, при прочих равных параметрах матрицы связей. Эта точность получается вследствие более рационального расположения столбцов матрицы связей. Анализируя матрицы типа H_6, можно сделать вывод, что при $K_p=2$ число столбцов матрицы можно увеличить до $C_8^2=\frac{8\times7}{2}=28$, что приводит к увеличению величины K_c до 3,5. Таким образом, анализ матриц связей позволяет получать оптимальные параметры годоскопических систем. При больших n и анализ можно проводить с помощью ЭВМ. И еще одно замечание. Как это следует из теории кодирования /19,20/, величина кодового расстояния в кодах с малой плотностью проверки на четность асимптотически растет с величиной n. Поэтому при больших n появляется возможность регистрировать кластеры большой длины, если использовать для кодирования матрицы типа H_6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель данной статьи состоит в том, чтобы привлечь внимание специалистов, занимающихся разработкой детекторов заряженных частиц, и создателей приборов ядерной электроники к более широкому применению теории и практики кодов, исправляющих ошибки, в годоскопических системах. Несмотря на то, что стоимость интегральных микросхем непрерывно уменьшается, в то же время растет сложность и число каналов считывания в искровых спектрометрах. Как показано на примерах, вопросы оптимального кодирования данных в годоскопических системах находятся в центре внимания физиков не менее 20 лет. При этом следует выделить два способа кодирования: 1/ на уровне вещества детектора /годоскоп Альвареца и др./, 2/ путем выполнения соответствующих связей вещества детектора со входами смесителей сигналов /ФЭУ и проч./.

Использование теории кодирования предполагает два аспекта проблемы, которые взаимно противоположны: а/ применение метода синдромного кодирования для сжатия данных в многоканальных системах и б/ введение информационной избыточности с целью улучшения пространственного разрешения детекторов.

Рассмотренная в данной работе система аналогий, по нашему мнению, может стимулировать дальнейшее использование алгебраической теории кодирования для целей оптимального построения аппаратуры для физики высоких и средних энергий. Здесь можно отметить три требования, возникающих при решении этой проблемы, которые нередко противоречивы: 1/ обеспечение регистрации многотрековых событий,2/ высокое быстродействие считывания данных с детекторов, 3/ экономичность создаваемой аппаратуры. Кодирование данных до усилителей позволяет экономить число каналов усиления и чтения данных в детекторах. Для этих целей требуется поиск и изучение таких кодов, в которых сохранялось бы достаточно большое кодовое расстояние при выполнении операции булевой суммы над столбцами матриц связей. Поиск таких кодов требует выполнения громоздких аналитических вычислений на ЭВМ.

Как показано в данной работе, применение алгебраической теории кодирования позволяет также создавать устройства для быстрого отбора событий по количеству сработавших датчиков, для выделения определенного сочетания сработавших датчиков и проч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alvarez L.W. The Rev. of Scient.Instr., 1960, vol.31, No.1, p.76.
2. Pellet D.E. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1974, vol.115, No.1, p.135-139.
3. Arignon M. et al. DI PH PE 80-09, 1980.
4. Nikitjuk N.M., Radzhabov R.S., Shafranov M.D. Nucl.Instr. and Meth., 1978, vol.155, No.1, pp.485-489.
5. Касами Т. и др. Теория кодирования. "Мир", М., 1978, с.7.
6. Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования. "Мир", М., 1966, с.18.
7. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. "Мир",М., 1976, с.134.
8. Никитюк Н.М., Раджабов Р.С., Шафранов М.Д. ПТЭ, 1978, №1, с.95-38.
9. Никитюк Н.М. ОИЯИ, Р11-80-484, Дубна, 1980.
10. Miyamoto S. Nucl.Instr. and Meth., 1964, vol.30, No.2, p.361.
11. Стахов А.П., Уточкин С.А. ИФВЭ, 79-141, Серпухов, 1979.

12. Азаров А.Д. и др. ИФВЭ, 79-184, Серпухов, 1979.
13. Сороко Л.М. ОИЯИ, Р13-5696, Дубна, 1971.
14. Сороко Л.М. ОИЯИ, Р13-6378, Дубна, 1972.
15. Heath F.G. Scient.Amer., 1972, vol.227, pp.76-83.
16. Lee Lapyen, Allred Jhon C., Goodman Clark. Nucl.Instr. and Meth., 1974, vol.119, No.1, pp.25-33.
17. Бугорский А.П., Борисов А.А., Деревщиков А.А. и др.ПТЭ, 1971, №2, с.89-91.
18. Bonozzola G.C. et al. JINR, D-5805, Dubna, 1971, p.265.
19. Бородин Л.Б. Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. "Сов. радио", М., 1965, с.253.
20. Галагер Р.Г. Коды с малой плотностью проверок на четность. В сб.: Теория кодирования /под ред. Э.Л.Блоха/, "Мир", М., 1964.
21. Gross Alan J. IRE Transaction on Information Theory, 1962, vol.IT-8, No.6, pp.356-359.
22. Elspas B., Short R.H. IRE Transaction on Information Theory, 1962, vol.IT-8, No.1, p.38.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 декабря 1981 года.