

сети может быть использована для оценки предельного значения параметров реальных сетей.

Исходя из требуемого быстродействия и числа процессоров в сети может быть получено минимальное число связей каждого коммутационного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lawrie D. H.— IEEE Transactions on Computers, 1975, v. c-24, № 12, p. 1145.
2. Шпаковский Г. И., Кац Б. А. Одноярусная коммутационная сеть для параллельных ЭВМ с одиночным потоком команд.— Рукопись деп. в ВИНТИ. № 359-81. Деп. от 28.01.81.
3. Шпаковский Г. И., Кац Б. А. Анализ некоторых систем коммутации параллельных ЭВМ с одиночным потоком команд.— Рукопись деп. в ВИНТИ. № 3513-80. Деп. от 07.08.80.

Поступила в редакцию
22.06.84.

УДК 621.383.292

С. С. ВЕТОХИН

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЧЕТЧИКА ФОТОНОВ С МОДУЛЯТОРОМ

Проблема отношения сигнал/шум (ρ) в счетчике фотонов решена относительно измеренного количества импульсов (N) на выходе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) [1, 2]. Однако принципиальная постановка задачи должна касаться оценки числа фотонов (M), попадающих на регистрирующий ФЭУ. Вместе с тем амплитудная дискриминация [3], обязательная в счетчиках фотонов, и модуляция светового потока считались [2] не вносящими искажений в статистику отсчетов, что было лишь удобным рабочим приближением. В этой связи выполнен статистический анализ регистрирующего канала счетчика фотонов с учетом указанных факторов.

Структурная схема типового счетчика фотонов включает в себя проекционную оптику, направляющую измеряемое излучение на катод ФЭУ. При этом световой луч может быть ослаблен нейтральными или селективными фильтрами и промодулирован механическим или электрооптическим модулятором с целью дальнейшего осуществления синхронного детектирования [4]. Получаемые на выходе ФЭУ импульсы после усиления и формирования поступают для отбора на интегральный или дифференциальный дискриминатор, настроенный для оптимального срабатывания по одноэлектронным импульсам. Отобранные импульсы регистрируются импульсным счетчиком, который при синхронном детектировании выполняется реверсивным с управлением от датчика состояния модулятора.

Очевидно, что световой поток, попадающий на входной зрачок оптической системы, всегда больше действующего на ФЭУ из-за поглощения в оптических деталях канала. Уменьшение потока описывается коэффициентами пропускания, которые могут быть промерены с достаточной для практики точностью. Могут быть также определены квантовая эффективность ФЭУ и эффективность отбора одноэлектронных импульсов дискриминатором. При известных перечисленных параметрах количество фотонов в исходном луче связано с количеством зарегистрированных импульсов соотношением

$$N = \prod_i T_i M + N_T, \quad (1)$$

где T_i — коэффициенты пропускания элементов оптической системы и эффективности электронного тракта; N_T — количество темновых отсчетов. По-видимому, оптические элементы, ФЭУ и дискриминатор могут рассматриваться как биномиальные фильтры, пропускающие фотоны с

вероятностями T_i . Возникающие в ФЭУ послепулсы могут быть учтены особо [5].

Для вычисления отношения сигнал/шум необходимо знать среднее значение определяемой величины M и дисперсию результата ее измерения. Чтобы не вычислять функцию распределения, воспользуемся теоремой о дисперсии, в соответствии с которой дисперсия потока событий при статистическом отборе определяется выражением

$$D_n^\alpha = D_\alpha n + D_n \alpha^2, \quad (2)$$

где D_n^α — дисперсия потока на выходе фильтра с собственной дисперсией D_α и коэффициентом пропускания α , причем исходный поток характеризуется дисперсией D_n и средним n . Для биномиального фильтра $D_\alpha = -\alpha(\alpha-1)$, а для исходного пуассоновского потока $D_n = n$. Тогда из (2): $D_n^\alpha = \alpha n$, что соответствует среднему. Очевидно, следующий биномиальный фильтр не изменит качественно картины, а дисперсия потока, прошедшего последовательность фильтров, $D = \prod_i \alpha_i n$. Сравнение этого

результата с выражением (1) даст нам

$$D_N = M \prod_i T_i + N_T, \quad (3)$$

если считать M и N_T пуассоновскими величинами. Поскольку полезную информацию об измеряемом потоке событий несет разность $N_c = N - N_T$, в которой значения N и N_T измеряются независимо, то практический интерес представляет величина

$$D_{N_c} = D_N + D_{N_T} = M \prod_i T_i + 2N_T = N_c + 2N_T. \quad (4)$$

Тогда отношение сигнал/шум принимает стандартный вид [2] с учетом выражения (1):

$$\rho_{N_c} = N_c / \sqrt{D_{N_c}} = N_c / \sqrt{N_c + 2N_T}. \quad (5)$$

При этом оценка M из (1) принимает значение

$$M = (N - N_T) / \prod_i T_i \quad (6)$$

с дисперсией при тех же статистических допущениях

$$D_M = (N + N_T) / (\prod_i T_i)^2, \quad (7)$$

что приводит к равенству $\rho_M = \rho_{N_c}$ и возможности пользоваться для расчета отношения сигнал/шум выражением (5).

Рассмотрим влияние на отношение сигнал/шум модулятора. Для механического модулятора с обычно близкой к двум скважностью выражение (5) может быть, очевидно, использовано непосредственно. Для электрооптических модуляторов 100 %-ная глубина модуляции не достигается, т. е. в открытом состоянии будет регистрироваться $N_1 = N_c + N_T$, а в закрытом — $N_2 = pN_c + N_T$ импульсов, где $p < 1$ — коэффициент пропускания закрытого модулятора. Тогда

$$N_c = (N_1 - N_2) / (1 - p), \quad D_1 = [N_c(1 + p) + 2N_T] / (1 - p)^2. \quad (8)$$

Очевидно, при прочих равных условиях такой модулятор увеличивает дисперсию и снижает отношение сигнал/шум.

Сравним также два типа неидеальных модуляторов, первый из которых вполне прозрачен в открытом состоянии, но обладает пропусканием p в закрытом, а второй имеет, будучи открытым, коэффициент пропускания γ , но обеспечивает полное запираение светового потока. Для первого из них справедливы выражения (8), что дает отношение сигнал/шум:

$$\rho_1 = N_c(1 - p) / \sqrt{[N_c(1 + p) + 2N_T]}. \quad (9)$$

Для второго $N_1 = \gamma N_c + N_T$, а $N_2 = N_T$, откуда

$$N_c = (N_1 - N_2) / \gamma, \quad D_2 = [\gamma N_c + (1 + \gamma) N_T] / \gamma^2. \quad (10)$$

Отношение сигнал/шум в этом случае

$$\rho_2 = N_c \gamma / \sqrt{[\gamma N_c + (1 + \gamma) N_T]}. \quad (11)$$

Сравнение этих двух случаев удобнее вести по взятым из выражений (8) и (10) дисперсиям, распространяя выводы и на отношения сигнал/шум. Тогда $D_1 > D_2$ при

$$(1 - p)^2 [\gamma N_c + (1 + \gamma) N_T] < \gamma^2 [N_c (1 + p) + 2 N_T]. \quad (12)$$

Решение неравенства (12) в явном виде получим в условиях «равной» неидеальности модуляторов, т.е. при $p = \gamma$. Тогда, если $N_c \gg N_T$, то $p > 0,33$, а если $N_c \ll N_T$, то $p < 0,46$. Предельные случаи охватывают, естественно, всю область определения монотонной функции, что дает окончательно $0,33 < p < 0,46$. Если же $p \neq \gamma$, то в случае $N_c \gg N_T$ уже при $p \geq 0$ из (12) следует $\gamma \approx 1$, а в случае $N_c \ll N_T$ даже при $p \approx 1$ единственное требование заключается в условии $\gamma > 0$.

Таким образом, выбор типа модулятора для счетчика фотонов должен осуществляться на основании предварительных оценок величины измеряемого сигнала: при малых сигналах целесообразно использовать хорошо просветляющиеся устройства (пропускание выше 0,46), при больших сигналах, по-видимому, особое значение имеет именно глубина модуляции, а не пропускание в режиме просветления. Очевидно, сделанные выводы качественно справедливы и при детектировании слабых световых сигналов методом измерения постоянного тока ФЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перцев А. Н., Писаревский А. Н. Одноэлектронные характеристики ФЭУ и их применение.— М., 1971.
2. Ветохин С. С., Гулаков И. Р., Перцев А. Н., Резников И. В. Одноэлектронные фотоприемники.— М., 1979.
3. Ветохин С. С., Пустынский И. Н., Резников И. В., Ташкун А. П.— В кн.: Оптическая и электрооптическая обработка информации. М., 1975, с. 41.
4. Ареччи, Гатти, Сола.— Приборы для научных исследований, 1966, № 7, с. 128.
5. Ветохин С. С.— Оптико-механическая промышленность, 1981, № 6, с. 7.

Поступила в редакцию
22.06.84.

УДК 539.1

Л. А. БОРИСОГЛЕБСКИЙ, А. Д. ЯКИМОВИЧ

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАПРЕЩЕННЫХ ПЕРЕХОДОВ, ВЫНУЖДЕННЫХ КВАДРУПОЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ЯДРА С ЭЛЕКТРОННОЙ ОБОЛОЧКОЙ АТОМА

Влияние квадрупольного момента ядра на запрещенные переходы в водородоподобных атомах рассматривалось в работе [1]. В частности, были определены вероятности дипольных электрических переходов, вынужденных квадрупольным взаимодействием ядра с электроном оболочечного атома. В качестве примера получены численные оценки относительной вероятности перехода $4^2F_{7/2} \rightarrow 1^2S_{1/2}$, равные для водородоподобных атомов дейтерия и ртути соответственно $0,5 \cdot 10^{-21}$ и $\sim 10^{-10}$ (относительно вероятности разрешенного перехода $2^2P_{3/2} \rightarrow 1^2S_{1/2}$). Однако в [1] все расчеты проведены в нерелятивистском приближении. В настоящей работе вероятности указанных переходов рассчитаны с помощью релятивистских волновых функций электрона.