

06.3;07

Использование сканирующего ПЗС-фотоприемника для сжатия оптических сигналов с линейной модуляцией по длине волны

© Н.А. Есепкина, А.П. Лавров

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 28 октября 1996 г.

Рассматривается процессор для сжатия оптических сигналов с линейной модуляцией по длине волны. Схема процессора соответствует схеме дифракционного спектрометра, однако в его спектральной плоскости установлен линейный ПЗС-фотоприемник, работающий в режиме временной задержки и накопления. Благодаря этому процессор выделяет сигнал из-под шума и является инвариантным к моменту прихода сигналов и перестраиваемым простым электронным способом на выделение сигналов с разной скоростью изменения длины волны. Коэффициент сжатия может составлять несколько тысяч раз. Обсуждаются другие характеристики процессора и его предельные возможности

1. Оптические методы обработки сигналов привлекают большое внимание благодаря своим уникальным потенциальным возможностям. Эти возможности определяются структурой оптических процессоров и используемой элементной базой, совершенствование которой приводит к увеличению их возможностей. Однако новые возможности по созданию оптических процессоров открывает и использование известных элементов в нетрадиционных режимах работы. Таким примером является применение в процессоре многоэлементных фоточувствительных приборов с зарядовой связью не в стандартном режиме работы в качестве датчика оптического изображения, а в специальном режиме временной задержки и накопления, иначе — режиме непрерывного сканирования [1]. Таким образом, были построены оптические процессоры для решения различных задач: линейного преобразования сигналов (свертка, корреляция, спектральный анализ), формирования радиоизображения

местности в системах с синтезируемой апертурой, отслеживание движения изображения в оптических телескопах при неподвижных зеркалах и др. [2–6]. Нами показано, что применение в хорошо известной схеме акустооптического анализатора спектра радиосигналов линейного фоточувствительного прибора с зарядовой связью в режиме временной задержки и накопления позволяет создать эффективный акустооптический процессор, осуществляющий сжатие радиосигналов с линейной частотной модуляцией [4,5]. В настоящей статье рассматривается подобный процессор, позволяющий сжимать оптические сигналы с линейной по длине волны модуляцией.

2. Структурная схема процессора оптических сигналов приведена на рисунке. В ней на плоскую пропускающую дифракционную решетку с периодом расположения штрихов d падает под углом α относительно нормали коллимированный пучок света с длиной волны λ . Дифрагированный свет собирается объективом Л с фокусным расстоянием F , в фокальной плоскости которого установлен линейный многоэлементный фотоприемник ФПЗС, работающий в режиме ВЗН. На фотоприемник от контроллера подаются управляющие импульсные фазные напряжения с частотой f , обеспечивающие непрерывное движение потенциальных ям в фотоприемнике и связанных с ними элементов. Выходной сигнал ФПЗС является выходным сигналом процессора. Данная оптическая схема соответствует схеме традиционного дифракционного спектрометра. В ней угол дифракции β относительно нормали к решетке определяется уравнением решетки [7]

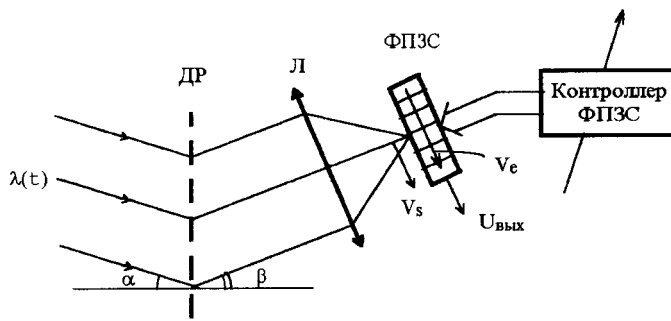
$$n \cdot \lambda = d \cdot (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (1)$$

где $n = \pm 1, \pm 2$ и т. д. — порядок дифракции. Далее будем рассматривать первый порядок ($n = 1$).

Если падающий на дифракционную решетку коллимированный пучок линейно модулирован по длине волны в соответствии с выражением

$$\lambda(t) = \lambda_0 + a \cdot t, \quad 0 \leq t \leq T_c, \quad (2)$$

где a — скорость изменения длины волны (скорость линейной модуляции); T_c — длительность модулированного оптического сигнала; λ_0 — средняя длина волны сигнала, то в спектральной плоско-



Структурная схема оптического процессора для сжатия оптических сигналов с линейной модуляцией по длине волны.

сти спектрометра формируется узкое пространственное распределение — отклик, положение которого l определяется выражением

$$l(t) = l_0 + v_s \cdot t, \quad (3)$$

где v_s — скорость перемещения отклика, определяемая скоростью изменения угла дифракции $d\beta/dt$ по формуле

$$v_s = F \cdot d\beta/dt; \quad (4)$$

l_0 — положение отклика в момент времени $t = 0$. Положение начала отсчета по координате l в данном рассмотрении не существенно.

В используемом режиме элементы фотоприемника, представляющего собой многоэлементный регистр сдвига с оптически прозрачными поликремниевыми электродами, непрерывной цепочкой (конвейером) перемещаются от одного конца фоточувствительной области к ее другому концу, при этом элементы одновременно выполняют детектирование оптического сигнала и его накопление в виде зарядовых пакетов [1]. В выходном узле фоточувствительного прибора с зарядовой связью эти зарядовые пакеты преобразуются в выходное напряжение. Скорость движения элементов v_e равна $l_e \cdot f$, где l_e — шаг расположения элементов в фотоприемнике, а f — частота фазных напряжений.

При равенстве скоростей перемещения элементов фотоприемника и спектрального отклика группа элементов перемещается

синхронно с ним, накапливая зарядовые пакеты, пропорциональные интенсивности света в отклике. На выходе фотоприемника в момент времени, однозначно связанный с моментом подачи на спектрометр оптического ЛВМ сигнала, появляется короткий по длительности видеоимпульс, амплитуда которого пропорциональна энергии ЛВМ сигнала. Таким образом, в процессоре происходит сжатие сигнала с линейной модуляцией и его детектирование.

Для определения условия равенства скоростей движения элементов и отклика рассмотрим выражение (4). Выразив скорость изменения угла дифракции через угловую дисперсию ДР

$$d\beta/dt = (d\beta/d\lambda) \cdot (d\lambda/dt) \quad (5)$$

и воспользовавшись выражениями (1) и (2), получим

$$d\beta/dt = a/(d \cdot \cos\beta) \quad (6)$$

и таким образом

$$v_s = F \cdot a/(d \cdot \cos\beta). \quad (7)$$

Для получения максимального выходного сигнала при его минимальной длительности в данном процессоре необходима неизменность скорости перемещения отклика в течение длительности обрабатываемого сигнала. Для линеаризации временного перемещения отклика в спектральной плоскости целесообразно параметры спектрометра выбрать такими, чтобы при $\lambda = \lambda_0$ угол дифракции $\beta = 0$, а ось объектива Л совпала с нормалью к решетке. В этом случае в значительном диапазоне длин волн $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ скорость движения можно полагать неизменной и равной $v_{s0} = a \cdot F/d$.

Тогда из условия равенства скоростей имеем

$$f = a \cdot F/(d \cdot l_e), \quad (8)$$

откуда видно, что требуемая частота фазных напряжений ФПЗС прямо пропорциональна скорости линейной модуляции длины волны в обрабатываемом (сжимаемом) сигнале. При смене скорости линейной модуляции необходимо простым электронным способом изменить частоту фазных напряжений; таким образом, процессор имеет свойство электронной перестройки на обработку разных ЛВМ сигналов.

При неравенстве скоростей движения элементов и отклика выходной сигнал ФПЗС быстро уменьшается по величине и увеличивается по длительности, что делает процессор селективным к сигналам скорости модуляции, задаваемым установленной частотой фазных напряжений.

Важно отметить, что фоновая засветка от широкополосных и монохроматических помех дает только изменение постоянной составляющей в выходном сигнале процессора.

Рассмотрим основные характеристики процессора.

А. Длительность сжатого сигнала на выходе процессора.

Длительность сжатого сигнала определяется временем прохождения δ_t длины волны обрабатываемого сигнала через ширину эквивалентного спектрального канала (разрешение спектрометра) $\delta\lambda$:

$$\delta_t = \delta\lambda/a. \quad (9)$$

Как известно [7], разрешение спектрометра определяется его разрешающей силой и равно

$$\delta\lambda = \lambda_0/N, \quad (10)$$

где N — число штрихов в дифракционной решетке. Таким образом,

$$\delta_t = \lambda_0/(N \cdot a). \quad (11)$$

Б. Коэффициент сжатия оптического сигнала.

Коэффициент сжатия определяется выражением

$$K_{сж} = T_c/\delta t = T_c \cdot a \cdot N/\lambda_0 = N \cdot \Delta\lambda_c/\lambda_0, \quad (12)$$

где $\Delta\lambda_c$ — диапазон изменения длины волны в обрабатываемом сигнале. Поскольку разрешающая сила спектрометров N может составлять тысячи и десятки тысяч, то $K_{сж}$ рассматриваемого процессора может достигать сотен и даже тысяч раз.

В. На эти характеристики процессора помимо параметров дифракционной решетки влияют и параметры фотоприемников с зарядовой связью.

Коэффициент сжатия ограничен сверху конечным числом элементов N_e в ФПЗС. При использовании 2–3 отсчетов (элементов фотоприемников) на протяженности отклика $\delta_1 = \delta\beta \cdot EK_{сж}$ не может превышать значение $K_{сж\max} \approx (0.3 - 0.4) \cdot N_e$. Отметим,

что выпускаются линейные фотоприемники с числом элементов, достигающим нескольких тысяч.

Длительность сжатого сигнала в процессоре ограничивается снизу быстродействием ФПЗС, поскольку скорость движения v_e его элементов ограничена сверху неэффективностью переноса зарядовых пакетов. Для выпускаемых промышленностью кремниевых ФПЗС с объемным каналом переноса зарядовых пакетов максимальная частота f_{\max} фазных напряжений составляет 10–20 МГц, что при 2–3 элементах ФПЗС на протяженности отклика дает оценку $\delta t_{\min} \approx 100\text{--}200$ нс.

Г. Диапазон длин волн сигналов.

Диапазон длин волн сигналов, которые могут обрабатываться в процессоре, определяется спектральным диапазоном используемого фотоприемника, и для кремниевых приборов он составляет 0.4–1.0 мкм.

Достоинствами рассматриваемого процессора являются: инвариантность к моменту прихода сигнала, адаптивность — электронная перестройка по скорости модуляции в широком диапазоне, высокая избирательность по скорости модуляции, работа в условиях сильной фоновой засветки от широкополосных и монохроматических помех.

Рассмотренный процессор может найти применение при создании различных измерительных систем, систем дистанционного зондирования, систем связи. В качестве управляемого источника оптического сигнала с линейной модуляцией по длине волны возможно, например, использование перестраиваемого полупроводникового лазера с внешним резонатором. Диапазон перестройки таких лазеров составляет десятки нанометров [8].

Список литературы

- [1] Барб Д.Ф. // Полупроводниковые формирователи сигналов изображений. Сб. статей / Под ред. П. Йесперса, Ф. Ван де Виле и М. Уайта: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 499–510.
- [2] Монахан М.А., Бромли К., Бокжер Р.П. // ТИИЭР. 1977. Т. 65. № 1. С. 148–157.
- [3] Псалтис Д. // ТИИЭР. 1984. Т. 72. № 7. С. 240–255.
- [4] Бондарцев С.Ю., Есепкина Н.А., Лавров А.П. // Автометрия. 1986. № 4. С. 89–99.

- [5] *Esepkina N.A., Lavrov A.P., Ananov M.A., Evtihiev N.N.* // Proc. SPIE. 1992. V. 1704. P. 115–124.
- [6] *Schneider D.F., Schmidt M., Gunn J.* // Astron J. 1994. V. 107. N 4. P. 1245–1269.
- [7] *Со́йер Р.* Экспериментальная спектроскопия. М.: Изд-во иностр. лит, 1953. 356 с.
- [8] *Pan Z., Zhang H., Yang J. et al.* // Proc. SPIE. 1993. V. 2482. P. 269–274.