

07:08

Акустооптический процессор радиосигналов с дискретной частотной модуляцией

© Н.А. Есепкина, А.П. Лавров, С.В. Дмитриев

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 18 ноября 1996 г.

Рассматривается процессор для обработки импульсных радиосигналов с дискретной частотной модуляцией, частота которых изменяется скачками внутри импульса и принимает N различных значений. Для разделения спектральных компонент используется акустооптический анализатор спектра, спектральная плоскость которого отображается на линейный фотоприемник с зарядовой связью с помощью плоского (одномерного) пространственного преобразователя, выполненного из оптических волокон. При отображении введенные в волокна спектральные компоненты сигнала переставляются между собой за счет специального расположения (перестановки) волокон. Фотоприемник с зарядовой связью, работающий в режиме временной задержки и накопления, осуществляет детектирование спектральных компонент и их сложение с требуемой задержкой и, таким образом, осуществляет сжатие сигнала и его выделение из-под шума. Коэффициент сжатия ограничен значением N и может составлять несколько сотен. Приведены результаты экспериментального исследования макета процессора.

1. В настоящее время большой интерес представляют оптические устройства обработки радиосигналов с применением фотоприемников с зарядовой связью. При использовании современной элементной базы (полупроводниковых лазеров, широкополосных акустооптических модуляторов, многоэлементных фотоприемников) такие устройства позволяют получить более высокие характеристики [1], чем аналогичные электронные устройства. Дополнительные возможности оптических процессоров появляются при использовании фотоприемников с зарядовой связью в режиме временной задержки и накопления. Этот режим позволяет создавать процессоры конвейерного типа, эффективные для решения различных задач, например для построения радиоизображения земной поверхности в системах с синтезируемой апертурой [2,3] и др. Ранее нами пока-

зна возможность [4] за счет использования таких фотоприемников временной задержки и накопления в режиме создать адаптивный акустооптический процессор радиосигналов с линейной частотной модуляцией.

В настоящей статье рассматривается подобный акустооптический процессор для обработки радиосигналов с дискретной частотной модуляцией. Такие сигналы в настоящее время широко используются в различных измерительных и связных системах. Изменение вида модуляции (дискретная модуляция вместо линейной) потребовало введения в схему процессора дополнительного элемента — преобразователя на основе оптических волокон.

2. Описание сигналов с дискретной частотной модуляцией можно найти в [5]. Мы будем рассматривать сигнал с дискретной частотной модуляцией как совокупность примыкающих во времени друг к другу N элементарных (парциальных) сигналов — простых радиоимпульсов:

$$U_{in}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} U_0 \cos[2\pi(f_d + \gamma_i \Delta f)t] \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{\tau} - \frac{1}{2} - i\right), \quad (1)$$

где $\text{rect}(x)$ определена так: 1, если $|x| \leq 1/2$, и 0, если $|x| > 1/2$; U_0 — амплитуда элементарного сигнала; τ — его длительность; $f_i = f_d + \gamma_i \Delta f$ — частота i -го элементарного сигнала; f_d — нижняя частота сигнала; Δf — дискрет изменения частоты; $\{\gamma_i\}$ — частотно-кодовая последовательность, определяющая порядок изменения во времени частоты в сигнале. Частотно-кодовая последовательность $\{\gamma_i\}$ имеет длину N ($i = 0, 1, \dots, N-1$) и представляет собой последовательность из N отличных друг от друга целых чисел в диапазоне от 0 до $N-1$, порядок следования которых определяется по специальным правилам [5] и внешне выглядит как случайный. Парциальные сигналы занимают по спектру совокупность N соседних каналов с суммарной полосой частот $N\Delta f$.

3. Структурная схема акустооптического процессора для обработки сигналов с дискретной частотной модуляцией изображена на рис. 1. Его основные элементы: 1 — лазер, 2 — расширитель-формирователь луча, 3 — акустооптический модулятор, 4 — Фурье-преобразующая линза, 5 — волоконно-оптический преобразователь, 6 — линейный ФПЗС, 7 — контроллер ФПЗС.

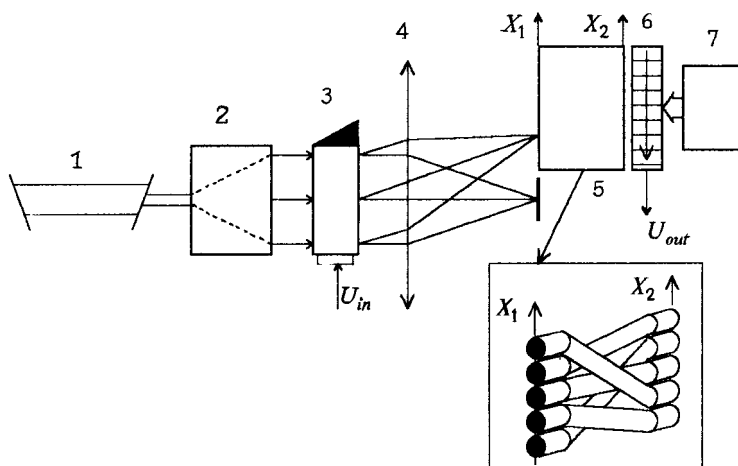


Рис. 1. Структурная схема акустооптического процессора сигналов с дискретной частотной модуляцией (1 — лазер, 2 — расширитель-формирователь пучка, 3 — акустооптический модулятор, 4 — Фурье-преобразующая линза, 5 — волоконно-оптический преобразователь, 6 — линейный фотоприемник с зарядовой связью, 7 — контроллер фотоприемника).

Принцип действия рассматриваемого процессора состоит в следующем. Акустооптический модулятор с Фурье-линзой производит спектральный анализ поданного на акустооптический модулятор радиосигнала [1]. Распределение интенсивности дифрагированного света в фокальной плоскости линзы соответствует спектру мощности радиосигнала. В результате при подаче на модулятор с дискретной частотной модуляцией сигнала в фокальной плоскости линзы (вдоль оси X_1) формируется дифракционное пятно, перемещающееся скачками через интервалы времени τ в разных направлениях в соответствии с изменениями частоты в поданном сигнале. Дискретные положения центра пятна определяются соотношением $X_{1i} = k \cdot f_i$, где k — коэффициент пропорциональности, определяемый оптическими элементами акустооптического спектроанализатора. На рис. 2, а для примера приведены положения дифракционного пятна в фокальной плоскости процессора для

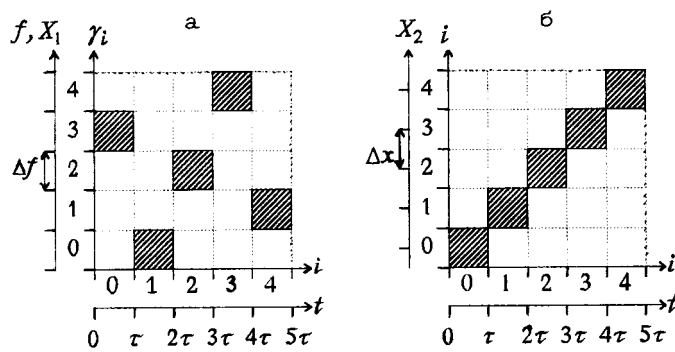


Рис. 2. Изменения во времени частоты сигнала с дискретной частотной модуляцией сигнала и положения центра дифракционного пятна на входе волоконно-оптического преобразователя (а) и на выходе преобразователя (б).

сигнала с короткой ($N = 5$) частотно-кодовой последовательностью $\gamma_i = 3, 0, 2, 4, 1$ и соответствующее частотно-временное представление этого сигнала.

В рассматриваемом акустооптическом процессоре в фокальной плоскости линзы установлен новый элемент — волоконно-оптический преобразователь, выполненный в виде однослойного плоского жгута из оптических волокон одинаковой длины. Число волокон в нем равно числу частотных дискретов в сигнале с дискретной частотной модуляцией, т. е. равно N . Волоконно-оптический преобразователь переносит изображение с интенсивностью I_1 из его входной плоскости в выходную на дискретном множестве площадок с размерами S , соответствующими диаметру сердцевины волокон. В рассматриваемом процессоре преобразователь отображает фокальную плоскость (вдоль оси X_1 , площадки с центрами в точках X_{1i}) на плоскость ФПЗС (вдоль оси X_2). В пределах площадок происходит усреднение входного изображения. Помимо отображения волоконно-оптический преобразователь выполняет и пространственное преобразование. Это осуществляется за счет перестановки волокон между собой в его выходной плоскости (рис. 1). Перестановка выполнена в соответствии с частотно-кодовой по-

следовательностью обрабатываемого сигнала по простому правилу: площадка с номером γ_i вдоль оси X_1 отображается на площадку с номером i вдоль X_2 . В таком случае интенсивности на входе волокон I_1 и выходе I_2 связаны соотношением $I_{2i} = I_{1\gamma_i}$.

При использовании в процессоре такого преобразователя разделенные с помощью акустооптического спектроанализатора спектральные составляющие с дискретной частотной модуляцией сигнала в виде дифрагированного излучения вводятся в соответствующее волокно через торец и передаются в плоскость фотоприемника, засвечивая выходные торцы вдоль оси X_2 поочередно (рис. 2, б). Таким образом, световое пятно от засвеченных торцов перемещается по фотоприемнику со средней скоростью $V_s = \Delta x / \tau$.

Фотоприемник в процессоре работает в режиме временной задержки и накопления. В этом режиме его элементы непрерывной цепочкой (конвейером) перемещаются от одного конца к другому, при этом элементы одновременно выполняют пространственную дискретизацию и детектирование оптического сигнала и его накопление в виде зарядовых пакетов [6]. В выходном узле эти пакеты преобразуются в выходное напряжение U_{out} . В режиме временной задержки и накопления выходное напряжение есть

$$U_{out}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} I_{2i}(t - (N-1)\Delta x/V_e), \quad (2)$$

где I_{2i} — интенсивность света на выходе волоконно-оптического преобразователя в i -м волокне (пропорциональная мощности i -й компоненты сигнала), а V_e — скорость движения элементов фотоприемника: $V_e = l_e \cdot F$, где l_e — шаг расположения элементов, а F — частота управляющих фазных напряжений, подаваемых на фотоприемник от контроллера (рис. 1).

При равенстве скоростей V_s и V_e выходной сигнал есть

$$U_{out}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} I_{2i}(t - (N-1)\tau), \quad (3)$$

т. е. происходит детектирование парциальных откликов всех частотных каналов и их сложение с требуемой задержкой. В этом случае на выходе формируется короткий видеоимпульс с амплитудой, пропорциональной энергии сигнала, и длительностью τ_c ,

близкой к длительности элементарного сигнала. Таким образом, в рассматриваемом процессоре происходит сжатие сигнала с дискретной частотной модуляцией и его детектирование. Процессор инвариантен к моменту прихода сигнала.

Реализуемый в процессоре коэффициент сжатия $K = N\tau/\tau_c$ не превышает значения N и ограничивается базой акустооптического модулятора и числом элементов фотоприемника. Имеющаяся в настоящее время элементная база позволяет реализовать $K_{\max} \approx 10^3$, что значительно больше, чем в электронных процессорах на основе набора полосовых фильтров [5]. Длительность сжатого сигнала ограничивается снизу из-за конечного быстродействия приемника значением $\tau_{\min} \approx 0.1-0.2$ мкс. Для обработки сигналов с разными частотно-кодowymi последовательностями необходима смена волоконно-оптического преобразователя.

4. Лабораторный макет акустооптического процессора был выполнен с использованием акустооптического модулятора на кристалле TeO_2 с временной апертурой 10 мкс и 500-элементного линейного фотоприемника типа ФПЗС-1Л. Волоконно-оптический пре-

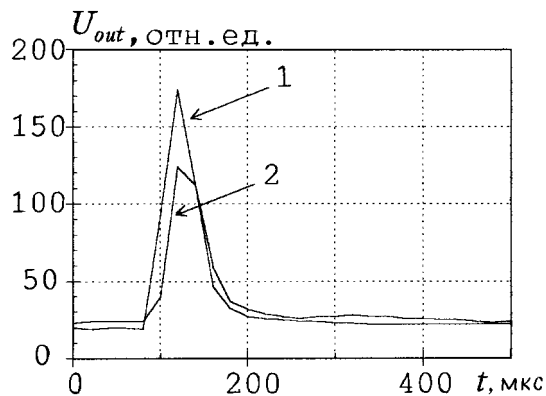


Рис. 3. Выходной сигнал акустооптического процессора для разных сигналов с дискретной частотной модуляцией. Кривая 1 — частотно-кодová последовательность сигнала согласована с волоконно-оптическим преобразователем, кривая 2 — частотно-кодová последовательность сигнала изменена.

образователь (жгут) состоял из 16 волокон с диаметром сердцевины 100 мкм и расстоянием между центрами во входной и выходной плоскостях 140 мкм и соответствовал сигналу с частотно-кодовой последовательностью $\gamma_i = 7, 2, 8, 12, 1, 4, 9, 13, 0, 5, 10, 14, 3, 6, 11, 15$. Сигнал с дискретной частотной модуляцией формировался с помощью генератора, управляемого напряжением. Длительность элементарного сигнала τ составляла 20 мкс, а длительность всего сигнала составляла 320 мкс. Управление генератора и регистрация выходного сигнала процессора производились с помощью ЭВМ типа IBM PC.

На макете были проведены различные эксперименты. Для примера на рис. 3 представлены выходные сигналы акустооптического процессора, полученные при подаче на его вход сигналов с разными частотно-кодовыми последовательностями. Кривая 1 соответствует сигналу, согласованному с расположением волокон в жгуте, кривая 2 — сигналу с измененной частотно-кодовой последовательностью (переставлены во времени 6 элементарных сигналов из 16). Как видно из рисунка, при измененной частотно-кодовой последовательности наблюдаются уменьшение амплитуды около 35%, что соответствует расчету, и увеличение постоянной составляющей выходного сигнала. Длительность выходного сигнала несколько больше ожидаемого значения 30 мкс.

Для исследования характеристик процессора и моделирования его работы создано необходимое программное обеспечение.

Таким образом, полученные результаты показывают, что при использовании акустооптики для разделения частотных компонент радиосигнала, а также волоконно-оптического преобразователя и фотоприемника с зарядовой связью временной задержки и накопления возможно создание акустооптического процессора, осуществляющего сжатие радиосигналов с дискретно-частотной модуляцией. Такой процессор может найти применение в различных радиоэлектронных системах.

Список литературы

- [1] Гусев О.Б., Кулаков С.В., Разживин Б.П., Тигин Д.В. Оптическая обработка сигналов в реальном времени. М.: Радио и связь, 1989. 136 с.
- [2] Псалтис Д. // ТИИЭР. 1984. Т. 72. № 7. С. 240–255.

- [3] *Есепкина Н.А., Гаврилов Г.А., Лавров А.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 1. С. 32–35.*
- [4] *Есепкина Н.А., Лавров А.П., Ананьев М.Н. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33. № 8. С. 51–55.*
- [5] *Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.*
- [6] *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.*