

А. ТАЙ, Ф. ЮУ
(Пенсильвания, США)

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛУЭТНОЙ ЗАПИСИ (модуляции)

Введение. Основные положения оптического спектрального анализа временных сигналов известны достаточно хорошо. Существенно, что исходный одномерный временной сигнал преобразуется в одномерный пространственный, который затем обрабатывается в оптическом спектральном анализаторе. Однако такое преобразование одномерного сигнала при использовании двумерных оптических анализаторов представляется весьма неэффективным. Действительно, в этом случае для обработки широкополосных сигналов потребовались бы очень большие оптические системы. Метод широкополосной обработки, предложенный Томасом [1] около 10 лет назад, позволяет полностью использовать возможности двумерных оптических систем при анализе одномерных временных сигналов. Согласно этому методу, для обработки широкополосных сигналов достаточно использовать обычные оптические системы. При этом возможен анализ сигналов с большим произведением пространства на ширину полосы порядка 16×10^6 [2].

Обычно при преобразовании временного сигнала в пространственный используется плотностная запись [3—6]. В этом случае входной сигнал в виде изменяющегося во времени напряжения преобразуется в изменяющийся по амплитудному пропусканию пространственный сигнал. Однако из-за нелинейности регистрирующей среды при такой записи довольно трудно обеспечить линейное соответствие. По этой причине был предложен альтернативный вариант записи сигналов в силуэтом виде. Так как силуэтная модуляция является двухградационной, то нелинейность среды в этом случае не играет роли [7—12]. Отметим, что силуэтная модуляция некоторое время использовалась для записи звука в кинематографии. Применение этой модуляции для целей спектрального анализа ранее было показано Дьяченко с соавторами [9] и Фелстидом [10]*. Спектрограммы речи были записаны оптически Алексовым [11] путем использования силуэтной дорожки звукозаписи в качестве входного сигнала. Перник показал возможность применения сигналов, записанных в силуэтом виде, для оптической корреляции [12]. В настоящей работе демонстрируется возможность использования силуэтной модуляции для обработки широкополосных сигналов.

Оптическое преобразование силуэтных сигналов. Силуэтная модуляция является простой операцией, формирующей изображение с двумя градациями пропускания. На рис. 1 показаны основные формы силуэтной модуляции: однополосная и двухполосная. Эти формы выбраны ввиду их простоты, но могут быть рассмотрены и другие типы модуляции. Так как силуэтно-модулированный сигнал задается в бинарном виде (т. е. прозрачен или непрозрачен), то это позволяет избежать влияния нелинейности регистрирующей среды. По этой причине для достижения хорошего тонального разделения предпочтительней использование высо-

© Appl. Opt., 1979, vol. 18, N 4.

* Ранее это рассматривалось в работе сотрудников ИАиЭ СО АН СССР (И. С. Гибин и др. Анализ спектров одномерных сигналов оптическими методами.— Автометрия, 1971, № 1). (Прим. ред.).

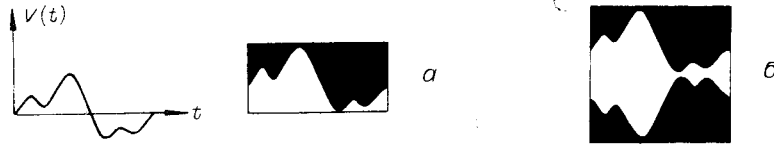


Рис. 1. Однополосные (а) и двухполосные (б) силуэтные записи.

контрастных пленок с сильной нелинейностью. Кроме того, из-за отсутствия строгих требований при изготовлении входного транспаранта техника силуэтной модуляции позволяет использовать более широкий класс регистрирующих сред. Эти среды в случае плотностной записи могут оказаться непригодными из-за нелинейности характеристики пропускания.

Двумерную функцию амплитудного пропускания транспаранта с двухполосной силуэтной записью можно представить в виде

$$T_1(x, y) = \text{rect} \frac{x}{L} \text{rect} \frac{y}{2[B + f(x)]}, \quad (1)$$

а транспаранта с однополосной силуэтной записью —

$$T_2(x, y) = \text{rect} \frac{x}{L} \text{rect} \frac{y - [f(x) - B]/2}{B + f(x)}, \quad (2)$$

где (x, y) — пространственные координаты системы, L — длина входного транспаранта в x -направлении, B — уровень пространственного смещения, $f(x)$ — входная сигнальная функция, а $\text{rect} \frac{A}{C} =$

$$= \begin{cases} 1, & A \leq C/2; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad \text{Видно, что уровень постоянного смещения}$$

следует выбирать так, чтобы $B \geq f(x)$ для всех x .

Если теперь силуэтный транспарант с пропусканием (1) или (2) поместить во входную плоскость когерентно-оптического процессора [13], то комплексное распределение света в выходной частотной плоскости будет иметь следующий вид:

$$G(p, q) = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(x, y) \exp[-i(px + qy)] dx dy, \quad (3)$$

где (p, q) — пространственно-частотные координаты, C — произвольная комплексная постоянная, а $T(x, y)$ — прозрачность транспаранта. Отметим, что в общем случае выражение (3) трудно оценить. Однако если мы ограничимся оценкой распределения лишь вдоль оси p , то в случае транспаранта с двухполосной силуэтной записью получим выражение

$G_1(p, 0) = C \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_1(x, y) \exp(-ipx) dx dy$, которое, как можно показать, приводится к виду

$$\begin{aligned} G_1(p, 0) &= 2C \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left(\frac{x}{L} \right) [B + f(x)] \exp(-ipx) dx = \\ &= 2C \left[\int_{-L/2}^{L/2} B \exp(-ipx) dx + \int_{-L/2}^{L/2} f(x) \exp(-ipx) dx \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, мы видим, что выражение (4) представляет собой одномерное преобразование Фурье от постоянной B и входной сигнальной функции $f(x)$. Следует также отметить, что это выражение имеет ту же

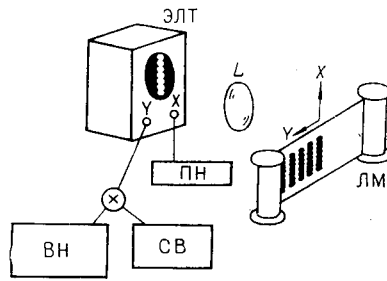


Рис. 2. Силуэтная регистрация сигнала:

ВН — высокочастотная несущая, ПН — пилообразное напряжение, СВ — смещенный вход, ЛМ — лентопротяжный механизм.

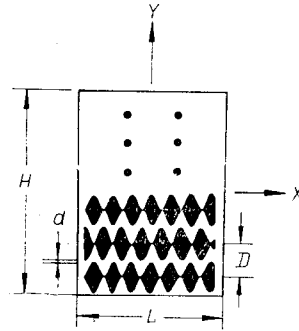


Рис. 3. Геометрия силуэтного изображения при широкополосной обработке сигналов.

структуру, что и в случае применения транспаранта с плотностной записью.

При использовании транспаранта с однополосной силуэтной записью распределение комплексной амплитуды поля вдоль оси p равно

$$G_2(p, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_2(x, y) \exp(-px) dx = C \left[\int_{-L/2}^{L/2} B \exp(-ipx) dx + \int_{-L/2}^{L/2} f(x) \exp(-px) dx \right] = \frac{1}{2} G_1(p, 0).$$

Спектральный анализ широкополосных сигналов. Силуэтные изображения, исходные для широкополосной обработки сигналов, могут формироваться с помощью электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). В этом случае входной сигнал сначала соответствующим образом смещается, а затем модулируется высокочастотной несущей. Далее модулированный сигнал вводится на y -вход ЭЛТ. Одновременно на x -вход подается пилообразное напряжение для получения развертки. Изображение, получаемое с ЭЛТ, регистрируется в виде полоски на пленке, движущейся в y -направлении. Путем соответствующего выбора скорости развертки вертикальные каналы с силуэтными записями сигналов можно регистрировать рядом, как показано на рис. 2. Скорость вертикальной развертки ЭЛТ должна быть достаточно высокой и удовлетворять условию

$$v > f_m/R,$$

где v — скорость развертки луча, f_m — предельная частота сигнала, а R — разрешение ЭЛТ. Скорость протяжки пленки выбирается такой, чтобы не возникало перекрытия соседних каналов. Что касается пространственного пропускания она должна быть не хуже разрешения ЭЛТ. Отметим, что описанный способ позволяет формировать транспаранты с двухполосной силуэтной записью. Путем маскирования половины развертки можно получить однополосную силуэтную запись.

Пропускание регистрирующего двумерного транспаранта можно представить как

$$f(x, y) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) \text{rect}\frac{y - nD}{2[B + f_n(x)]}, \quad (5)$$

где $N = H/D$ — число линий сканирования (каналов) во входной апертуре, $f_n(x) = f(x + nD)$ — функция пропускания n -го канала, B — постоянное смещение, D — расстояние между каналами, H и L — высота и ширина входного формата (рис. 3).

Если мы поместим транспарант с пропусканием (5) во входную плоскость когерентно-оптического процессора, то распределение комплексной амплитуды поля в частотной плоскости (p, q)

$$F(p, q) = \sum_{n=-N}^N C \int_{-L/2}^{L/2} [B + f_n(x)] \operatorname{sinc}\{q[B + f_n(x)]\} \exp[-i(px - nDq)] dx. \quad (6)$$

Для того чтобы устранить неопределенность при считывании высоких дифракционных порядков, выберем в частотной плоскости лишь один из первых дифракционных порядков. Это можно осуществить путем маскирования всей выходной плоскости за исключением области

$$-\pi/D \leq q \leq \pi/D, \quad 0 \leq p < \infty. \quad (7)$$

Если $D > 2B$, то функцию $\operatorname{sinc}(\cdot)$ в (6) в пределах апертуры (7) можно аппроксимировать выражением

$$\operatorname{sinc}\{q[B + f_n(x)]\} \simeq 1. \quad (8)$$

Видно, что условие $D > 2B$ необходимо также для исключения перекрытия соседних каналов входного транспаранта. С учетом выражения (8) комплексное распределение света за открытой апертурой маски можно переписать в виде

$$F(p, q) = H(p, q) \sum_{n=1}^N C \int_{-L/2}^{L/2} [B + f_n(x)] \exp[-i(px + nDq)] dx,$$

где

$$H(p, q) = \begin{cases} 1, & -\pi/D \leq q \leq \pi/D, \quad 0 \leq p; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

В качестве иллюстрации рассмотрим случай широкополосного сигнала в виде синусоиды, т. е.

$$f_n(x) = \sin[p_0(x + nL)], \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

Распределение амплитуды света за маской

$$F(p, q) = C_1 \operatorname{sinc}\left(\frac{LP}{2}\right) + C_2 \operatorname{sinc}\left[\frac{L}{2}(p - p_0)\right] \sum_{n=1}^N \exp[in(Lp_0 + Dq)]$$

(C_1 и C_2 — комплексные постоянные). Соответствующее распределение интенсивности

$$I(p, q) = |F(p, q)|^2 = K_1 \left[\operatorname{sinc}\left(\frac{LP}{2}\right) \right]^2 + K_2 \left\{ \operatorname{sinc}\left[\frac{L}{2}(p - p_0)\right] \right\}^2 \times \\ \times \sum_{n=1}^N \exp[in(Lp_0 + Dq)] \sum_{n=1}^N \exp[-in(Lp_0 + Dq)],$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты пропорциональности. Используя хорошо известное тождество

$$\sum_{n=1}^{\infty} \exp(i2n) \sum_{n=1}^N \exp(-i2n\Theta) = \left(\frac{\sin N\Theta}{\sin \Theta} \right)^2,$$

выражение можно переписать в виде

$$I(p, q) = \left[K_1 \operatorname{sinc} \left(\frac{LP}{2} \right) \right]^2 + K_2 \left\{ \operatorname{sinc} \left[\frac{L}{2} (p - p_0) \right] \right\}^2 \left(\frac{\sin N\Theta}{\sin \Theta} \right)^2. \quad (9)$$

Здесь $\Theta = 1/2(LP_0 + Dq)$. Видно, что выражение (9) аналогично результату, получаемому при использовании транспарантов в плотностном формате [4, 3, 13].

могут быть получены путем подстановки $\Theta = n\pi$, что дает

$$q = (1/D)(2n\pi - Lp_0), \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

Таким образом, последний член обеспечивает высокое спектральное разрешение в q -направлении. Из (10) видно, что положение любого из импульсов определяется частотой сигнала p_0 . Изменение этой частоты ведет к соответствующему изменению положения импульса, т. е.

$$dq = (L/D)dp_0.$$

Это смещение в направлении q пропорционально смещению в p -направлении. Так как ширина импульса уменьшается при увеличении числа каналов N , то выходной спектр дает частотную дискриминацию, эквивалентную той, которая достигается в одномерном процессоре при использовании полутонного сигнала длиной NL .

Заметим, что импульсы последовательности $(\sin N\Theta/\sin \Theta)^2$ отстоят друг от друга на расстояние $2\pi/D$. Следовательно, при увеличении частоты входного сигнала один импульс покидает открытую область при $q = -\pi/D$, а другой — входит в нее при $q = \pi/D$, описывая таким образом в открытой области выходной маски траектории частоты в виде диагоналей (рис. 4).

В качестве иллюстрации на рис. 5 приведен спектр синусоидальной картинки. Этот спектр получен с использованием силуэтной модуляции и техники обработки широкополосных сигналов. Белые линии внутри него указывают границы щелевой апертуры. Следует отметить, что спектр внутри апертуры совпадает со спектром, получаемым при полутонной записи [13], а отсутствие ложных спектров свидетельствует о том, что он не подвержен вредному влиянию нелинейности пленки. Однако использование силуэтной модуляции при обработке широкополосных сигналов имеет один недостаток. Он связан с тем, что для записи сигнала в силуэтном виде требуется гораздо больше пространства (по оси y), чем для записи его в плотностном виде. Таким образом, если используется силуэтная модуляция для преобразования сигнала с заданной величиной произведения времени на ширину полосы, от системы потребуется большее пространство, чем при плотностной модуляции. Например, предположим, что силуэтная модуляция имеет однополосную форму, а каждый канал отдален на минимальное расстояние, равное размеру одного элемента разрешения (или размеру пятна электронного луча). Тогда возможное произведение пространства на ширину полосы для данного размера системы будет в $\{H/(2d)\}/\{H/[(n+1)d]\} = (n+1)/2$ раза больше при записи сигнала в плотностном виде, нежели в силуэтном (H — высота системы, d — размер элемента разрешения, n — динамический диапазон входного сигнала). Для двухполосной формы силуэтной модуляции эта величина будет больше в $(n+1)$ раз.

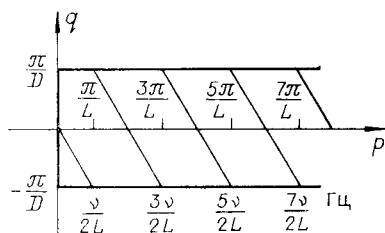


Рис. 4. Траектория выходной частоты.

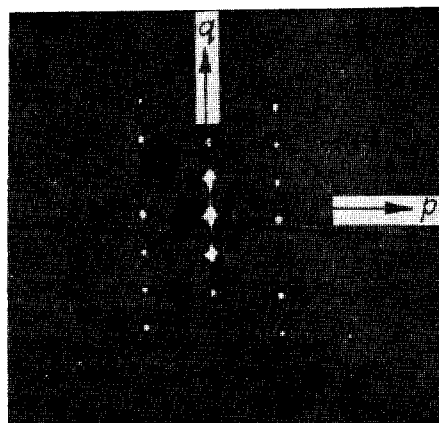


Рис. 5. Спектр широкополосного синусоидального сигнала.

Заключение. Нами показана возможность использования силуэтной модуляции для обработки широкополосных сигналов. Такая модуляция позволяет избежать влияния нелинейности среды при записи сигналов. Так как эта модуляция не требует точного контроля экспозиции и режима проявления, то она гораздо легче реализуется на практике. Однако при силуэтной записи достигается меньшее произведение пространства на ширину полосы (при заданных размерах апертуры системы), чем при плотностной. Тем не менее благодаря эффективному использованию двумерного формата оптического анализатора произведение пространства на ширину полосы, достигаемое в такой системе, оказывается достаточно большим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas C. E.— Appl. Opt., 1966, N 5, p. 1782.
2. Markevitch B. V.— In: 3-rd Annual Wideband Recording Symposium. Rome Air Development Center. April 1969.
3. Yu F. T. S.— Acoust. Soc. Am., 1972, vol. 51, p. 433.
4. Yu F. T. S.— IEEE Spectrum., 1975, vol. 12, p. 51.
5. Lin J. C., Yu F. T. S., Tai A. Coherent Optical Analysis of Ultrasonic Blood Flow Spectrum.— In: 29-th Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology. Boston, Mass, November 1976, p. 137.
6. Lin J. C., Yu F. T. S., Tai A.— IEEE Trans. Biomed. Eng., 1978, vol. 25, p. 243.
7. Tai A. M., Lin J. C., Yu F. T. S., Karadsheh S. Spectral Studies of Heart Sound by Coherent Optical Technique.— Proc. Biomed. Symp. San Diego, February 1977, p. 17—23.
8. Spattiswoode R. Film and its Techniques. Berkeley, U. California Press, 1964.
9. Dyachenko A. A., Persikov M. V., Shushpaav O. E.— Opt. Spectrosc., 1971, vol. 31, p. 249.
10. Felstead E. B.— Appl. Opt., 1971, vol. 10, p. 2468.
11. Aleksoff C. C. Environmental Research Institute of Michigan (private communications).
12. Pernick B. J. Appl. Opt., 1972, vol. 11, p. 1425.
13. Yu F. T. S. Introduction to Diffraction Information Processing and Holography. Cambridge, MIT Press, 1973.

Поступила в редакцию 30 апреля 1979 г.