А. П. Волощенко
П. Ю. Волощенко

Моделирование и обработка сигналов для акустических приборов и систем

учебное пособие

ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЮФУ
РОСТОВ-НА-ДОНУ·ТАГАНРОГ

УДК 534, 681.883, 004.4, 004.94
ББК 32.875, 32.973
В686

Печатается по решению кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (протокол № 21 от 5 февраля 2020 г.)

Рецензенты:

заместитель генерального директора по качеству ОАО «ТНИИС» (г. Таганрог), кандидат технических наук, старший научный сотрудник
А. Ф. Гришков

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных измерительных технологий и систем Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ЮФУ *И. И. Турулин*

Волощенко, А. П.

В686 Моделирование и обработка сигналов для акустических приборов и систем : учебное пособие / А. П. Волощенко, П. Ю. Волощенко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – 135 с.

ISBN 978-5-9275-3531-6

Учебное пособие посвящено моделированию и обработке сигналов в программах Matlab 9.6 и Mathcad 14. Рассмотрены наиболее часто применяемые в гидроакустике сигналы для активной и пассивной гидролокации.

Подробно описаны свойства гармонических сигналов, случайных сигналов простых и сложных видео- и радиоимпульсов. Также подробно рассмотрены и описаны примеры моделирования и обработки этих сигналов в Matlab 9.6 и Mathcad 14. Все примеры сопровождаются практическими заданиями для самостоятельного выполнения.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 12.03.01 «Приборостроение», 17.03.01 «Корабельное вооружение» и специальности 26.05.04 «Применение и эксплуатация технических систем надводных кораблей и подводных лодок», а также научных работников по специальностям 01.04.06 «Акустика» и 05.11.06 «Акустические приборы и системы».

УДК 534, 681.883, 004.4, 004.94
ББК 32.875, 32.973

ISBN 978-5-9275-3531-6

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ. ВИДЫ СИГНАЛОВ

Приступая к изучению каких-либо новых объектов или явлений, в науке всегда стремятся провести их классификацию. Предпримем такую попытку применительно к сигналам.

В общем случае, под сигналом понимается физический процесс, несущий сообщение о каком-либо событии или состоянии объекта, протекающий в пространстве и во времени и охватывающий определенный спектральный диапазон длин волн, т.е. это материальная (физическая) форма представления информации. Существует несколько способов классификации сигналов [1, 2], один из которых показан на рис. 1.

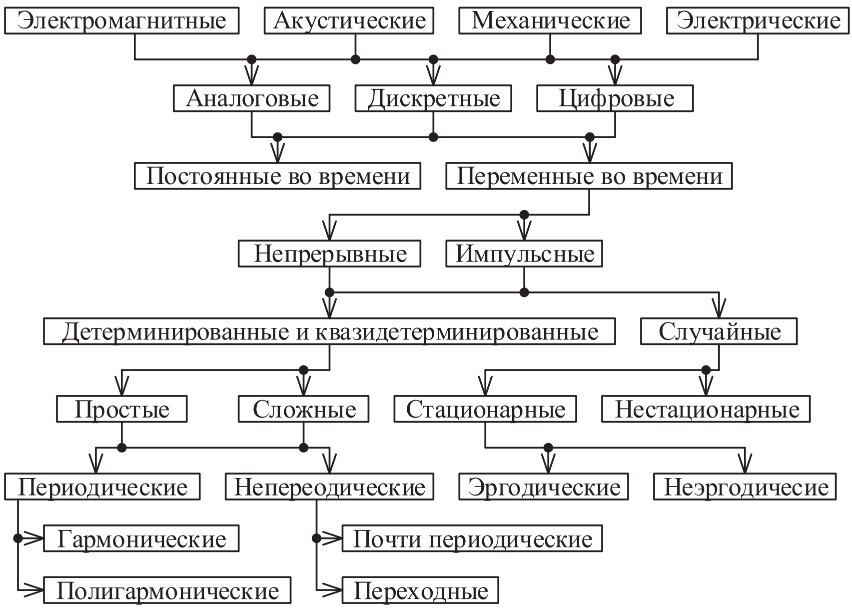

Рис. 1. Классификация сигналов

В зависимости от физической природы носителя сигнала различают следующие сигналы:

– электромагнитные и, в частности, оптические, или радиоэлектронные;

– акустические;

– механические;

– электрические.

Для решения большинства задач в гидроакустике используют акустические и электрические сигналы. Акустический сигнал – это возмущение упругой среды, проявляющееся в возникновении акустических колебаний различной формы и длительности. Электрический сигнал – это изменяющаяся во времени физическая величина (ток, напряжение, напряженность электрического или магнитного полей и т.д.), которая содержит сообщение или информацию. Акустический и электрический сигналы неразрывно связаны друг с другом и постоянно преобразуются из одного в другой и обратно. Однако электрический сигнал легче сформировать, обработать и отобразить. Поэтому в данном мы учебном пособии ограничимся рассмотрением только электрического сигнала. Сам электрический сигнал будем считать зависимостью напряжения от времени.

По особенностям структуры временного представления все электрические сигналы делятся на аналоговые, дискретные и цифровые (см. рис. 1). Аналоговый сигнал – это сигнал, описываемый непрерывной или кусочно-непрерывной функцией, причем как сама эта функция, так и ее аргумент могут принимать любые значения на заданных интервалах напряжения и времени [3, 4]. Дискретный сигнал получают из аналогового путем специального преобразования. Процесс преобразования аналогового сигнала в последовательность отсчетов на временной оси называется дискретизацией, а результат такого преобразования – дискретным сигналом или дискретным рядом [1]. Таким образом, функция дискретного сигнала принимает любые значения на заданных интервалах напряжения только в фиксированные моменты времени. Формирование и обработку сигналов можно производить в любой форме. Поэтому мы опять же ограничимся рассмотрением только дискретных сигналов.

По характеру изменения напряжения во времени сигналы делятся на переменные и постоянные (см. рис. 1). Переменные сигналы меняются с течением времени, а постоянные остаются неизменными во времени. Переменные сигналы подразделяются на непрерывные во времени и импульсные (см. рис. 1). У непрерывного сигнала параметры изменяются непрерывно. Импульсный сигнал – это сигнал конечной энергии, существенно отличный от нуля в течение ограниченного интервала времени, соизмеримого с временем завершения переходного процесса в системе, для воздействия на которую этот сигнал предназначен [3, 4].

По степени наличия априорной информации переменные сигналы делятся на детерминированные, квазидетерминированные и случайные (см. рис. 1). Детерминированный сигнал – это сигнал, функция изменения которого известна, а модель не содержит неизвестных параметров. Мгновенные значения детерминированного сигнала известны в любой момент времени. Квазидетерминированные сигналы – это сигналы с частично известным законом изменения во времени, т.е. с одним или несколькими неизвестными параметрами. Случайный сигнал – это сигнал, мгновенное значение которого является случайной величиной [3, 4].

Детерминированные и квазидетерминированные сигналы делятся на простые и сложные. Простые сигналы описываются простейшими математическими формулами. К ним относятся постоянные и гармонические сигналы, а также сигналы, описываемые единичной и дельта-функцией. К сложным сигналам относятся импульсные и модулированные сигналы [3, 4].

Простые и сложные сигналы могут быть как периодическими, так и непериодическими. Непериодические сигналы делятся на почти периодические и переходные. Почти периодическим сигналом называется сигнал, значения которого приближенно повторяются при добавлении к временному аргументу выбранного числа – почти периода. Периодический сигнал является частным случаем таких сигналов. Почти периодические функции получаются в результате сложения периодических функций с несоизмеримыми периодами. Переходные сигналы описывают переходные процессы в физических системах [3, 4].

Периодическим называется сигнал, мгновенные значения которого повторяются через постоянный интервал времени. Период сигнала – параметр, равный наименьшему интервалу времени. Частота периодического сигнала – величина, обратная периоду. Периодический сигнал характеризуется спектром. Различают три вида спектра: комплексный, амплитудный, фазовый. Периодический сигнал содержит ряд гармоник. Гармоника – гармонический сигнал с амплитудой и начальной фазой, равными соответствующим значениям амплитудного и фазового спектра периодического сигнала при некотором значении аргумента. Наличие высших гармоник в спектре периодического сигнала количественно описывается коэффициентом гармоник, характеризующим отличие формы данного периодического сигнала от гармонической [3, 4].

Периодические сигналы бывают гармоническими, т.е. содержащими только одну гармонику, и полигармоническими, спектр которых состоит из множества гармонических составляющих. К гармоническим сигналам относятся сигналы, описываемые функцией синуса или косинуса. Все остальные сигналы являются полигармоническими [3, 4].

Все рассмотренные выше типы сигналов применяются в гидроакустике. Однако далее мы будем рассматривать только те сигналы, которые наиболее часто встречаются в активной и пассивной гидролокации.

2. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ

Дискретизация – это определение значений непрерывного сигнала в дискретные моменты времени [1, 5, 6]. На практике чаще всего встречаются два вида дискретизации – дискретизация низкочастотных и полосовых сигналов. Полосовая дискретизация – частный случай более общей низкочастотной дискретизации.

Сформулируем теорему Котельникова (теорема Найквиста, теорема о дискретном представлении, теорема отсчетов). Если f_{max} это самый высокочастотный компонент сигнала, то дискретизацию сигнала необходимо выполнять с частотой не менее $2f_{max}$. Тогда элементы дискретной выборки будут полностью корректно описывать сигнал. В итоге справедливо неравенство

$$F_S \geq 2f_{max},$$

где F_S – частота дискретизации [5].

К примеру, если $f_{max} = 4$ кГц, то чтобы достоверно сохранить всю информацию в сигнале, дискретизацию необходимо выполнять с частотой 8 кГц или больше.

Если производить дискретизацию с частотой меньше необходимой, то это приведет к появлению наложения зеркальных частот в исследуемой частотной области. Тогда при обратной операции, т.е. преобразовании дискретного сигнала в аналоговый, восстановить исходный сигнал будет невозможно.

Всегда необходимо учитывать тот факт, что существенная часть энергии сигнала может находиться за пределами исследуемой частотной области. Также в сигнале может присутствовать шум, ширина полосы которого всегда будет больше f_{max}. Поэтому если не удалить «лишний» сигнал или шум, имеющий частотные компоненты за пределами полосы исследуемых частот, то теорема Котельникова выполняться не будет. На практике удаление лишних компонент реализуется путем пропускания сигнала через аналоговый фильтр до дискретизации.

Выполним дискретизацию сигнала с интервалом T (рис. 2). Сигнал на рис. 2 очень простой (гармонический), он состоит всего из одной частотной компоненты.

Если период дискретизации T выбрать неправильно, то, согласно рис. 2, полученные дискретные выборки будут соответствовать не только реальному исходному сигналу, но и наложенному сигналу с более низкой частотой. Этот эффект называется наложением. Если реальный сигнал содержит множество частотных компонентов, то результат наложения становится более сложным. Исследовать наложение нужно в частотной области [5].

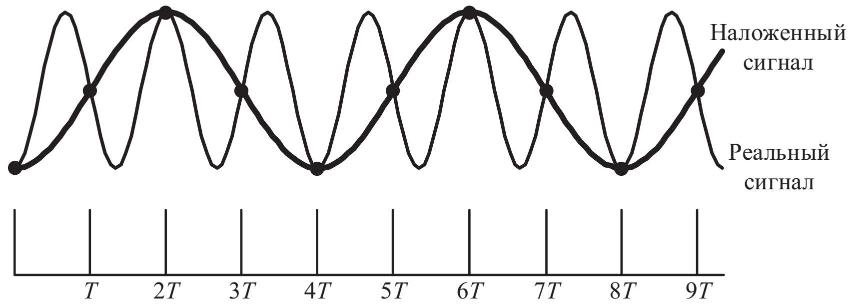

Рис. 2. Наложение во временной области

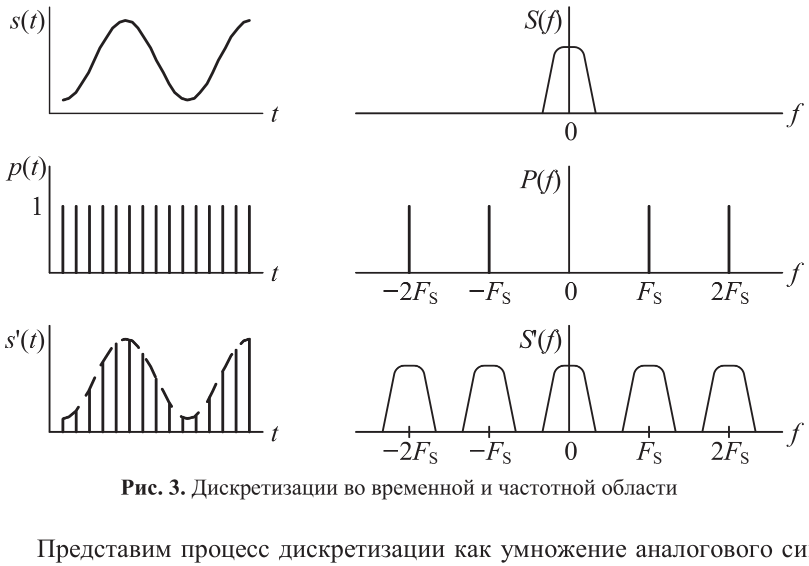

Рис. 3. Дискретизации во временной и частотной области

Представим процесс дискретизации как умножение аналогового сигнала $s(t)$ на выборочную функцию $p(t)$. Функция $p(t)$ состоит из импульсов единичной амплитуды с шириной dt (бесконечно малой) и периодом T. В результате умножения получаем функцию $s'(t)$ (рис. 3). В правой части рис. 3 показаны: амплитудный спектр сигнала $S(f)$, спектр выборочной функции $P(f)$ и амплитудный спектр дискретного сигнала $S'(f)$.

Отметим следующие особенности дискретного сигнала [5]:

– спектр идентичен исходному аналоговому спектру, только повторяется в точках, кратных частоте дискретизации F_S. Компоненты более высокого порядка с центрами в точках, кратных F_S, называются зеркальными частотами;

– если частота дискретизации F_S не соответствует теореме Котельникова, то зеркальная частота с центром в F_S и частота основной полосы будут пересекаться. Происходит искажение информации в основной полосе. Тогда сигнал невозможно восстановить из частотной во временную область без искажения;

– пересечение основной полосы сигнала и зеркальной полосы сигнала происходит в районе точки F_N, которая равна половине частоты дискретизации (рис. 4). Эту точку называют частотой Найквиста, или частотой Котельникова.

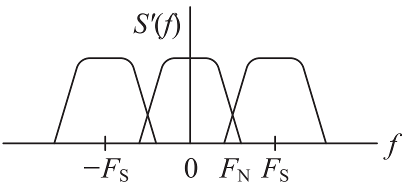

Рис. 4. Пересечение основной полосы сигнала и зеркальной полосы сигнала

Задача исследователя – определить допустимый уровень пересечения и принять меры по его уменьшению:

– создать фильтр защиты с резким срезом, уменьшающий уровень пересечения спектров и ограничивающий полезную полосу сигнала;

– увеличить частоту дискретизации, чтобы разнести как можно дальше друг от друга спектр основной полосы сигнала и зеркальный спектр.

В идеале фильтр должен устранить все частотные компоненты с частотой, превышающей частоту наложения. В качестве примера приведем характеристики эллиптического фильтра 5-го порядка с частотой среза f_c = 2 000 Гц, уровнем пульсаций 0,5 дБ в полосе пропускания и 20 дБ в полосе задержания. Идеальная амплитудная характеристика такого фильтра показана на рис. 5, а.

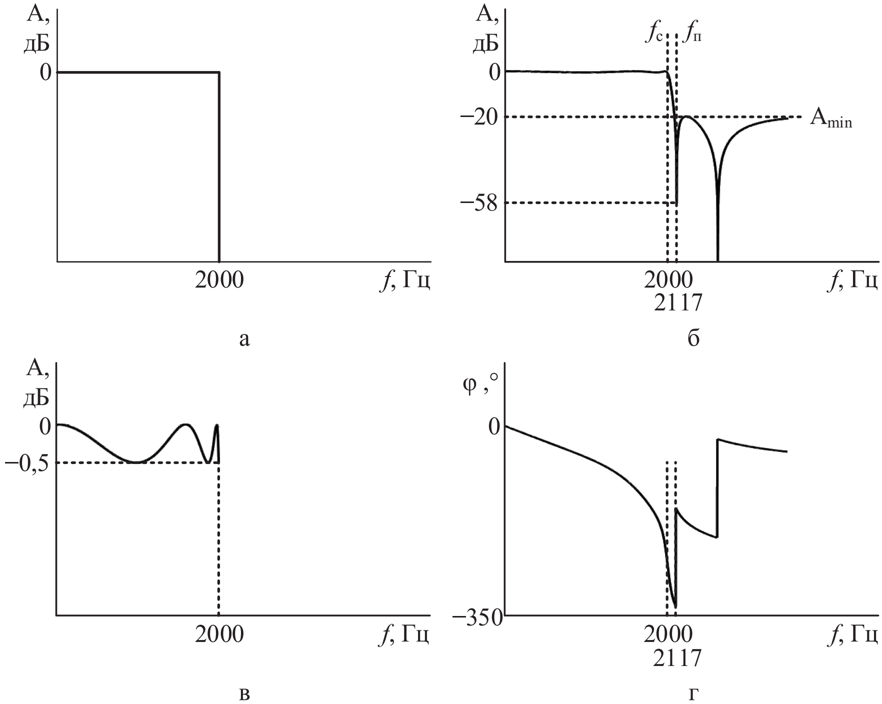

Рис. 5. Характеристики эллиптического фильтра: а – идеальная амплитудно-частотная характеристика; б – реальная амплитудно-частотная характеристика; в – реальная полосовая амплитудно-частотная характеристика; г – реальная фазочастотная характеристика

Реальная амплитудно-частотная характеристика (рис. 5, б) обладает полосой перехода, поэтому искажает амплитуду сигнала. Полоса перехода расположена между частотой среза $f_с$ и частотой подавления $f_п$. Внутри полосы перехода амплитуды частотных компонентов будут спадать монотонно, а компоненты, превышающие $f_п$, находящиеся в полосе подавления, будут подавляться только на A_{min}. Кроме того, реальная полосовая амплитудно-частотная характеристика фильтра не плоская (рис. 5, в), поэтому амплитуда сигнала искажается и в полосе пропускания фильтра. Реальная фазочастотная характеристика в силу своей нелинейности (рис. 5, г) вносит фазовые искажения в сигнал. Частотные компоненты исходного сигнала после прохождения через фильтр будут задерживаться на величину, не пропорциональную их частотам [5].

Для большинства практических случаев фазовыми и амплитудными искажениями, вызванными нелинейностью фазочастотной характеристики и неравномерностью полосовой амплитудно-частотной характеристикой фильтра, можно пренебречь. Учитывать только искажения, создаваемые полосой перехода фильтра. Чем она шире, тем больше искажается сигнал при прохождении через фильтр. Поэтому часто в силу неидеальности характеристик реальных фильтров в качестве эффективной частоты Котельникова можно использовать частоту полосы подавления $f_п$.

При подборе фильтра желательно учитывать требования к разрешению АЦП. Фильтр нужно выбрать так, чтобы частоты, превышающие частоту Котельникова, подавлялись до уровня, неразличимого для АЦП, например, до уровня, меньшего, чем шум квантования. Для системы, в которой используется B-битовый линейный АЦП, минимальное затухание в полосе подавления фильтра определяется по формуле

$$A_{min} = 20\lg\left(\sqrt{1{,}5} \times 2^{B}\right), \text{ дБ},$$

где B – количество битов АЦП. Значения A_{min} для различных значений B приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Значения минимального затухания в полосе подавления для различных разрешающих способностей АЦП

Разрешающая способность АЦП, бит	Минимальное затухание в полосе подавления A_{min}, дБ
8	50
10	62
12	74
16	98

В качестве примера прохождение широкополосного сигнала $s(t)$ через устройство дискретизации, состоящее из фильтра нижних частот (ФНЧ) и дискретизатора (рис. 6). ФНЧ реализуем в виде фильтра Баттерворта 6-го порядка с частотой среза $f_c = 5$ кГц. Частота дискретизации дискретизатора равна 20 кГц.

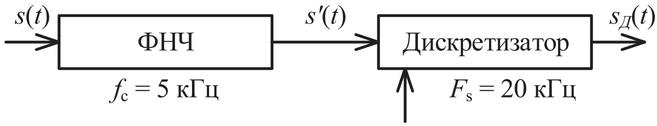

Рис. 6. Схема устройства дискретизации

Во-первых, покажем спектр сигнала до дискретизации и после нее (рис. 7). Форма каждого спектрального компонента имеет ту же форму, что и амплитудно-частотная характеристика фильтра Баттерворта:

$$K(f) = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{fc}\right)^{2\cdot n}}},$$

где n – порядок фильтра.

Во-вторых, спектр сигнала на выходе фильтра равен произведению спектра сигнала и амплитудно-частотной характеристики фильтра: $S(f) \times |K(f)|$. Для входного широкополосного сигнала $s(t)$ спектр $S(f)$ является плоским. Пусть $S(f)$ и $K(f)$ нормированы, т.е. их максимальное значение равно 1. Тогда уровень сигнала на выходе фильтра определяется характеристикой аналогового фильтра [5].

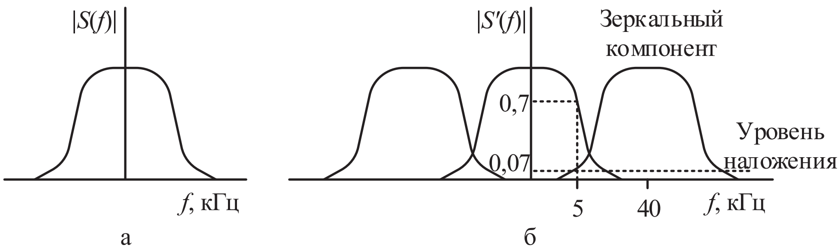

Рис. 7. Спектр сигнала: а – до дискретизации; б – после дискретизации

На частоте среза уровень нормированного сигнала равен

$$S_{5\text{кГц}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{5}{5}\right)^{12}}} = 0{,}707;$$

а уровень наложения на частоте 15 кГц равен

$$S_{\text{н}15\text{кГц}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{15}{5}\right)^{12}}} = 0{,}0014.$$

Частота Котельникова (10 кГц) является точкой пересечения характеристик основной и зеркальной полос дискретного сигнала, поэтому уровни сигнала и искажения от наложения одинаковы:

$$S_{10кГц} = S_{н10кГц} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{10}{5}\right)^{12}}} = 0{,}016.$$

В-третьих, мы найдем минимальную частоту дискретизации, при которой на частоте 5 кГц соотношение сигнала к уровню искажения от наложения равно 10:1. На частоте 5 кГц уровень сигнала равен 0,707, поэтому отношение 10:1 предполагает уровень наложения в 0,0707. Рассчитаем частоту наложения зеркального компонента

$$f_н = \sqrt[12]{\frac{5^{12}\cdot(1-0{,}0707^2)}{0{,}0707^2}} = 7{,}77 \text{ кГц}.$$

Следовательно, необходимая частота дискретизации равна $f_н + 5 = 12{,}77$ кГц. Таком образом, при частоте дискретизации 12,77 кГц уровень искажения от наложения в 10 раз меньше уровня сигнала 5 кГц.

Далее рассмотрим апертурный эффект аналого-цифрового преобразователя. На практике при дискретизации сигналов мгновенная выборка невозможна, поэтому функция отсчетов имеет конечную ширину. АЦП осуществляет дискретизацию каждого отдельного отсчета не мгновенно, а за определенное время t_a. В течение этого времени сигнал изменяется на величину U_a. Данный эффект называется апертурным (рис. 8).

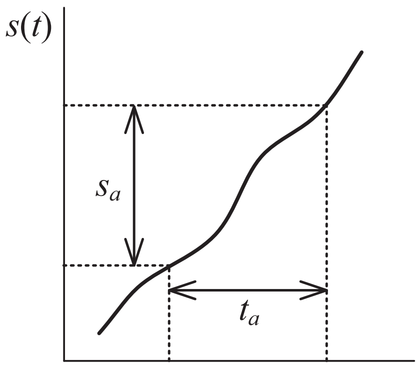

Рис. 8. Апертурный эффект