

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1	
СИГНАЛ — ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ.....	5
ГЛАВА 2	
ПОЛУЧЕНИЕ СИГНАЛА С ЗАДААННЫМИ СВОЙСТВАМИ	
И ИХ ОБРАБОТКА	7
ГЛАВА 3	
СИГНАЛ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ	27
ЛИТЕРАТУРА	52

ВВЕДЕНИЕ

Всегда ли надо делать так, как другие считают правильным, может быть, правила уже устарели, и их необходимо менять или корректировать. Всё ли сделано для того, чтобы с минимальными затратами получать необходимый результат. Такие мысли появляются у любого, кто пытается на практике применить огромный потенциал знаний, накопленный в области цифровой обработки сигнала. Умные люди отвечают на эти вопросы правильно — читайте учебники, там всё уже есть. Но как бы много не было в учебниках формул, понятий и заключений, в которых необходимо разбираться, постепенно приходится начинать делать свои выводы, иногда отличающиеся от общепринятых. Задача данной работы заключается в переосмыслении хорошо известных понятий с целью более удобного и наглядного их представления за счёт привлечения современных методов исследовательской деятельности и в конечном итоге изложения своих выводов из полученных результатов. Такую затею обычного инженера можно назвать «бредовой», если учесть, сколько учебников, научных работ и прочего посвящено теме цифровой обработки сигнала. Вот только достаточно ли «бредовыми» будут выводы, чтобы быть интересными. Это можно узнать, прочитав работу.

ГЛАВА 1

СИГНАЛ — ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ

Хорошо известно, что применение того или иного закона очень сильно зависит от практической реализации. Не является исключением и цифровая обработка сигнала. Так как связью занимались ученые разных профилей, то и каноническое изложение того или иного раздела темы цифровой обработки зависит от того, кто им занимался. В итоге некоторые аспекты оказались рассмотренными со всех сторон, кроме тех, которые хотелось бы.

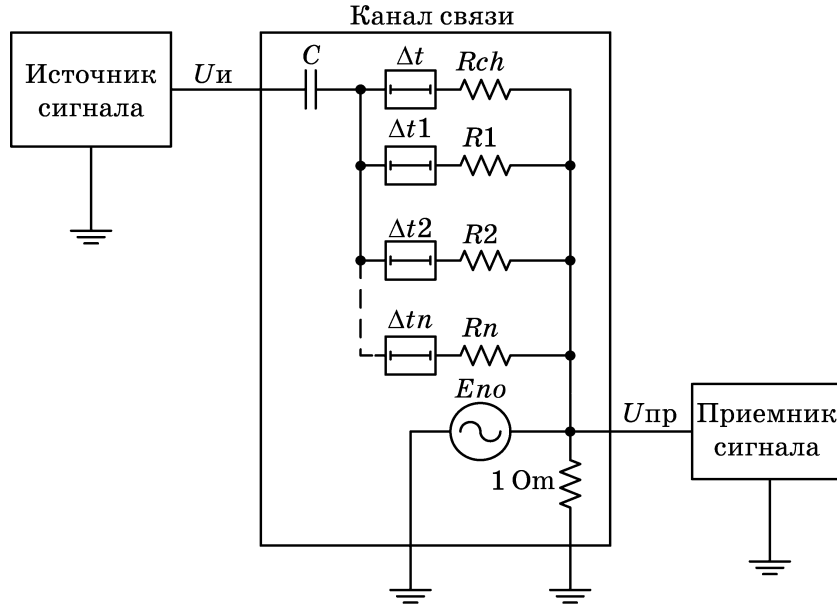


Рис. 1

Анализируя представления, сложившиеся на сегодняшний день о передаче сигнала и воздействии на него канала связи, можно представить процесс передачи и приема сигнала схемой, приведенной на рисунке 1. Она достаточно просто и наглядно представляет, что происходит при передаче сигнала, если учесть, что все параметры элементов канала связи могут меняться самым неожиданным образом.

Особых пояснений она, наверное, не требует, но следует отметить, что какими бы сложными ни были понятия информации передающего её сигнала и сопутствующие им алгоритмы обработки, передаваться они будут только тогда, когда на выходе источника сигнала появится напряжение $U_{и}$. Скорее всего, это будет напряжение синусоидальной формы, манипулированное тем или иным способом. А прием сигнала начнется только тогда, когда в напряжении $U_{пр}$, являющемся смесью сигнала, шума и помех, появится ощутимая приёмником часть напряжения $U_{и}$. Поэтому понятно, что чем больше будет напряжение $U_{и}$, тем больше шанс принять передаваемый сигнал.

Все существующие алгоритмы приема сигнала в той или иной форме используют накопление энергии. Это значит, что приёмник, анализируя принимаемую энергию, извлекает из неё полезную информацию. Поэтому можно сказать, что передача сигнала, по сути, является передачей энергии, и от того, насколько эффективно она будет передаваться, зависит конечный результат — качество приёма. При этом эффективным должен быть как приём, так и передача сигнала.

Не стоит приводить формулы, относящиеся к передаче энергии, они хорошо известны, стоит только отметить, что энергия не зависит от частоты (полосы частот) сигнала. В нашем случае излучаемая энергия будет полностью определяться напряжением $U_{и}$ и временем, в течение которого оно действует.

Понятно, что при передаче сигнала действует закон сохранения энергии, поэтому, анализируя сигнал в полосе частот, следует учитывать тот факт, что для расширения полосы частот

при неизменной спектральной плотности энергии полезного сигнала придется пропорционально увеличивать мощность передатчика, а она обязательно ограничена.

При передаче сигнала всегда стремятся к получению максимально возможной скорости передачи, то есть энергию следует передавать с максимально возможной скоростью, что необходимо учитывать при формировании сигнала. Однако это требование очень трудно обеспечить, используя сложный сигнал, особенно при излучении многих частот.

Параметром характеризующим, насколько хорошо сформирован сигнал с позиции эффективного использования излучаемой энергии, является пик-фактор, равный отношению максимального напряжения сигнала к его среднеквадратическому значению. В литературе, посвящённой цифровой обработке сигнала, крайне сложно найти хотя бы упоминание о нём. Но для того, чтобы получить эффективный прием сигнала, надо начать с его эффективной передачи.

Сложный сигнал, имеющий пик-фактор, равный 2, считается очень хорошо сформированным, а ведь он использует всего 25% максимально возможной энергии от той, которую можно получить при излучении синусоидального сигнала той же длительности. Для того чтобы понять, почему это важно, надо учесть, что у передатчика всегда ограничена не только мощность, но и напряжение выходного сигнала. Это значит, что увеличение пик-фактора сигнала автоматически приводит к уменьшению энергии излучаемого сигнала. Поэтому следующая глава посвящена получению и обработке сигналов, удобных для использования и имеющих в том числе максимально возможную энергетическую эффективность.

ГЛАВА 2

ПОЛУЧЕНИЕ СИГНАЛА С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ И ИХ ОБРАБОТКА

Получение сигнала с нужными параметрами является одной из главных задач разработчика систем связи. В настоящее время современная вычислительная техника позволяет выполнять очень сложные процедуры цифровой обработки сигнала в режиме реального времени, но и её ресурсы не безграничны, особенно если используются устройства с автономным питанием.

Огромное число работ по всем областям связи приводит к мысли, что надо просто выбрать нужное из того, что есть. Но это не так-то просто, особенно если необходима привязка к конкретным практическим условиям, а то, что есть в учебниках, относится, либо к другой области, либо вообще имеет абстрактный характер.

Для того чтобы можно было правильно сделать выбор, необходимо очень хорошо разбираться в предельно достижимых параметрах связи для тех или иных условий её применения.

Гидроакустика — это та область, в которой труднее всего обеспечить надежную связь, так как все отрицательные стороны канала связи здесь проявляются в максимальной степени, а хорошо проверенные в других условиях алгоритмы не работают. Именно здесь и можно проверить, насколько хороши те или иные сигналы, понять, что нужно для получения максимально эффективной системы связи.

В данной области приходится иметь дело не с сигналами определенной длительности, а с периодами (по сути «квантами») той или иной частоты, что позволяет хорошо разобраться с тонкой структурой сигнала.

Но для того чтобы оценить свойства сигнала, необходимо правильно его принять, то есть правильно выбрать способ его обработки. С другой стороны, только грамотно сформированный сигнал может быть эффективно принят. Поэтому невозможно отделить одно от другого, и процесс выбора сигнала всегда происходит таким образом, что при формировании сигнала всегда подразумевается способ его приёма.

Проверить правильность принимаемых решений в настоящее время позволяет высокоэффективная система Matlab. Она значительно упрощает и делает дешевле процесс исследований, но без натурных испытаний, подтверждающих результаты математического моделирования, этот процесс будет незавершенным. Однако чем лучшие результаты удастся получить в процессе моделирования, тем больше вероятность получения хороших результатов и в реальных условиях.

Рассмотрим известный алгоритм обработки сигнала, который можно назвать аналогом прямого преобразования Фурье для одной частоты, приводимый, например, в [1, с. 225, рис. 4.18]. На рисунке 2 представлена аналогичная схема, составленная из блоков программы Simulink Matlab.

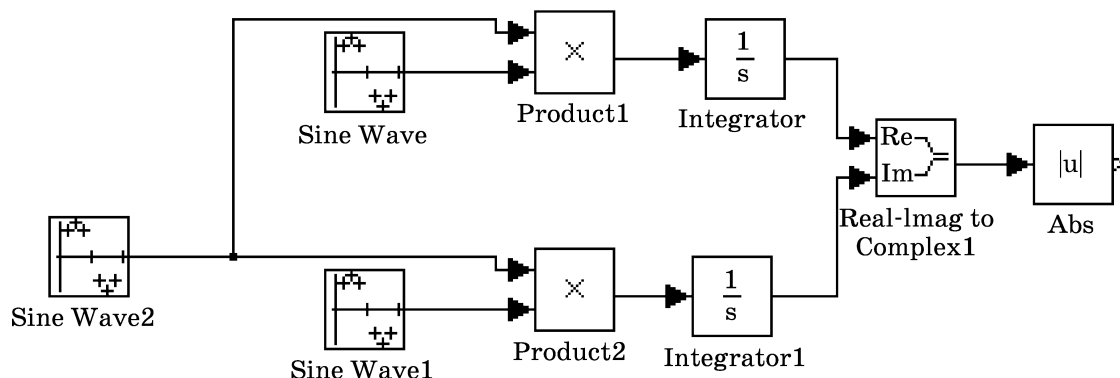


Рис. 2

В данном случае генератор Sine Wave2 является сигналом, а генераторы Sine Wave и Sine Wave1 синтезируют синусную и косинусную составляющие этой же частоты. Далее, после перемножения происходит интегрирование двух составляющих сигнала. Длительность интегри-

рования определяется ожидаемой длительностью сигнала и должна быть равна ему. Понятно, что всё это происходит в цифровом виде.

Если нам требуется непрерывно следить за сигналом, то данные интегрирования необходимо постоянно обновлять. Для этого можно накапливать в специальных буферных устройствах отсчеты сигнала после перемножителей, выбрасывать самые старые и, записывая новые, тут же вычислять новое значение на выходе интеграторов.

Существует вариант более простой, когда не вычисляют каждый раз новое значение интеграла, а используют старое, добавляют к нему новый отсчет и вычитают самый старый, при этом остается необходимость буферных устройств.

Существенно упрощается указанная процедура, если, добавляя каждый раз новый отсчет, вычитать не конкретное значение, хранящееся в буфере, а среднее значение от уже накопленных отсчетов, что позволяет избавиться от двух буферных накопителей с операциями их обновления. Получаем очень простой алгоритм низкочастотной фильтрации, требующий всего одну ячейку памяти для каждой из ветвей обработки сигнала. Собранный из блоков Simulink, он изображен на рисунке 3.

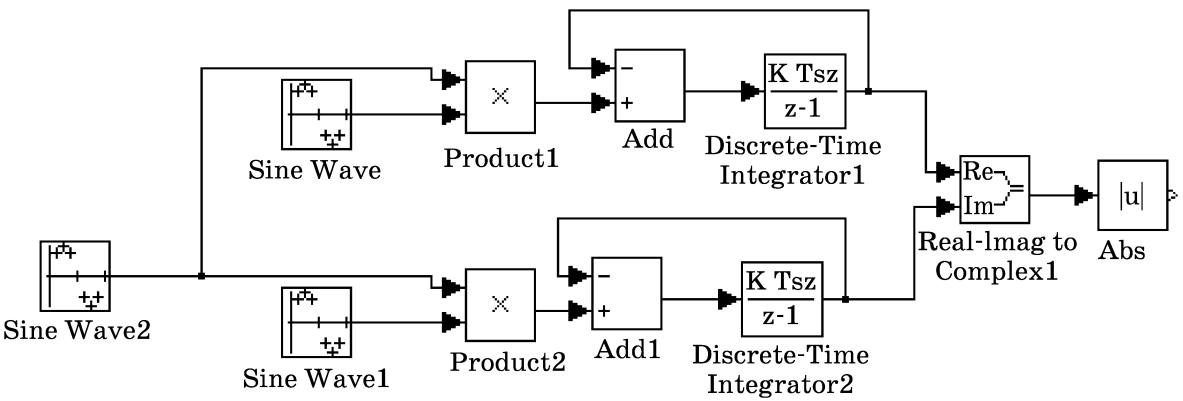


Рис. 3

В качестве интегратора здесь используется модуль с возможностью установки коэффициента усиления, который и будет в данном случае определять постоянную времени накопления фильтра. Для микропроцессора это будет одна ячейка, в которую постоянно суммируются поступающие отсчеты сигнала (накапливающий сумматор), её содержимое периодически делится на определенное число (удобно, если это 2^n), полученный результат вычитается из этой же ячейки. Чем реже делается указанная операция или чем больше число, на которое делится содержимое ячейки, тем больше постоянная времени фильтра. Если операция вычитания делается каждый раз после операции суммирования, то постоянная времени фильтра будет точно соответствовать интервалу квантования, умноженному на число, записанное в делителе. То есть постоянная времени фильтра — это число, на которое делится содержимое ячейки.

В результате получаем простой алгоритм фильтрации с одной ячейкой памяти, так как у нас отсутствует необходимость хранения отсчетов сигнала, а используется только их сумма.

На рисунке 4 представлена схема фильтра, являющаяся аналоговым прототипом данного алгоритма.

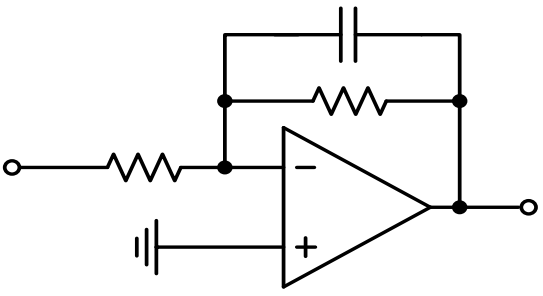


Рис. 4

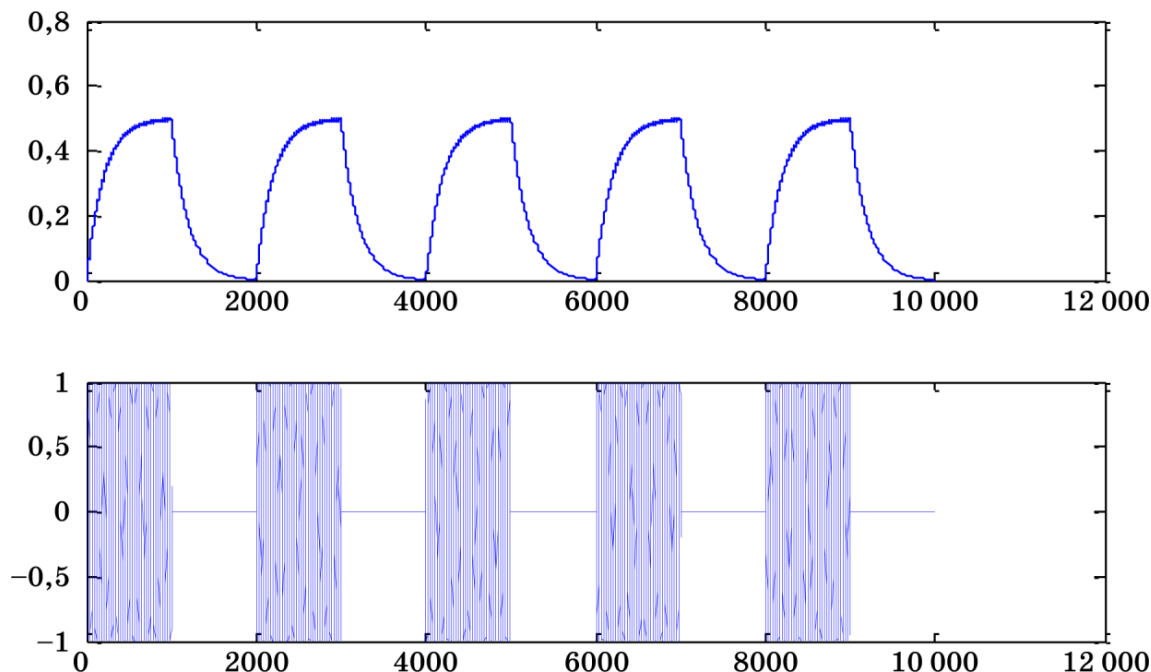


Рис. 5

На рисунке 5 показана осциллограмма напряжения на выходе схемы (рис. 3) при подаче на её вход прерывающегося синусоидального сигнала (нижняя часть рисунка).

Программа, выполняющая операцию фильтрации последовательности модулированных прямоугольных импульсов на языке Matlab, приведена ниже (рис. 6).

```

Fs = 192000;
f = 10000;
T = 0:10000;
x = sin(2*pi*f*T/Fs);
y = cos(2*pi*f*T/Fs);
q = zeros(1,1000);
v = ones(1,1000);
z = [v q v q v q v q v q 0];
b = z.*x;
n = 200;
Zx = [b.*x 0];
for u = 1:10000;
m = Zx(u)+Zx(u+1);
rez = m-m/n;
Zx(u+1) = rez;
end
Zx = Zx/(n-1);
Zy = [b.*y 0];
for u = 1:10000;
m = Zy(u)+Zy(u+1);
rez = m-m/n;
Zy(u+1) = rez;
end
Zy = Zy/(n-1);
Z = sqrt(Zx.^2+Zy.^2);
subplot(2,1,1); plot(Z)
subplot(2,1,2); plot(b)

```

Рис. 6

По сути, это алгоритм работы накапливающего сумматора с функцией декремента, зависящего от величины содержимого ячейки, в котором число (n) задаёт постоянную времени фильтра 1-го порядка. Так как алгоритм точно соответствует экспоненциальному закону, то с его помощью можно вычислить число e , ниже приведена программа, делающая это.

```

y = ones(1,1000000);
Z = [y 0];
n = 1000000;
for u = 1:1000000;
m = Z(u)+Z(u+1);
rez = m-m/n;
Z(u+1) = rez;
end
Z = Z/(n-1);
Z1 = Z(1000000);
e = 1/(1-Z1)
e =
    2.7183

```

Если необходим фильтр 2-го порядка, то приведенную программу фильтра 1-го порядка следует повторить. Понятно, что таким образом можно легко наращивать порядок фильтра, меняя их параметры, получать нужные амплитудно-частотные и фазовые характеристики, подгоняя их под существующие стандарты, но это тема другой работы и, видимо, другого автора, так как в данной работе это не цель, а средство достижения цели.

Как использовать указанную схему в качестве полосового фильтра? Напрямую этого сделать не удастся, но если использовать обратное преобразование, аналогичное обратному преобразованию Фурье, это получится. Схема, поясняющая алгоритм, приведена на рисунке 7.

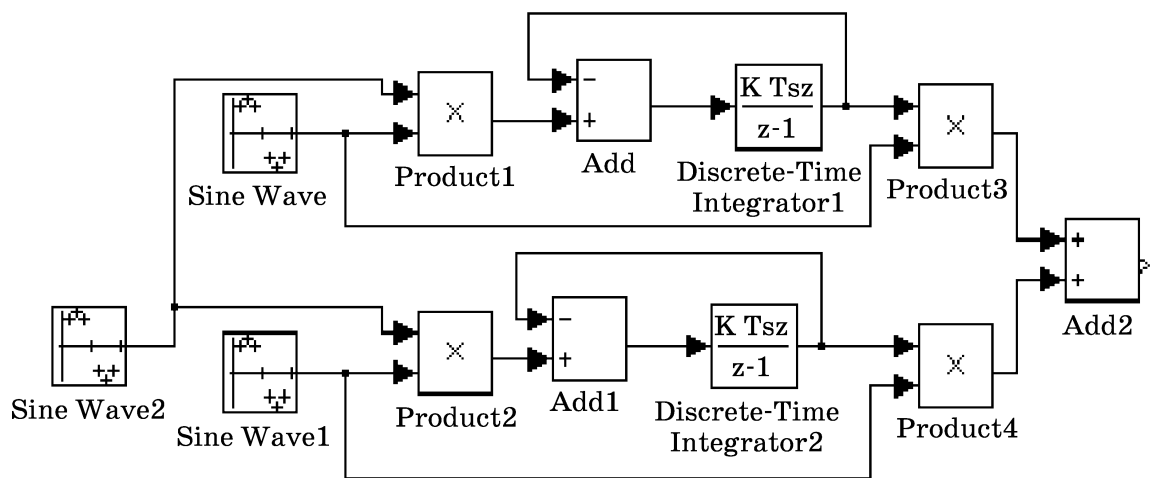


Рис. 7

Как видно, используется часть прежней схемы, к которой добавлены два умножителя и сумматор. Видимо, программу, делающую то же самое, приводить не стоит.

Таким образом выполнялась фильтрация сигнала в аналоговом виде ранее, когда компьютеры ещё только зарождались, а теперь то же самое можно выполнять с помощью цифровой техники.

Данный вид фильтра идеально подходит для микропроцессорной техники, так как в этом случае не нужно работать с массивом данных, как это делает Matlab. Но задача состоит в том, чтобы то, что будет получаться при моделировании в Matlab, точно соответствовало алгоритмам, пригодным для использования любой техникой.

Попробуем сравнить результат работы схемы на рисунке 2, известной как квадратурный приёмник для некогерентного детектирования, и наиболее близкую к нему функцию `хсогт` в Matlab.

На рисунке 8 показаны различия выходного напряжения блоков обработки сигнала при приёме одного и десяти периодов заданной частоты, если использовать стандартную функцию `хсогт` — слева (1, 3), и алгоритма приёмника для некогерентного детектирования, приводимого во многих учебниках, — справа (2, 4).

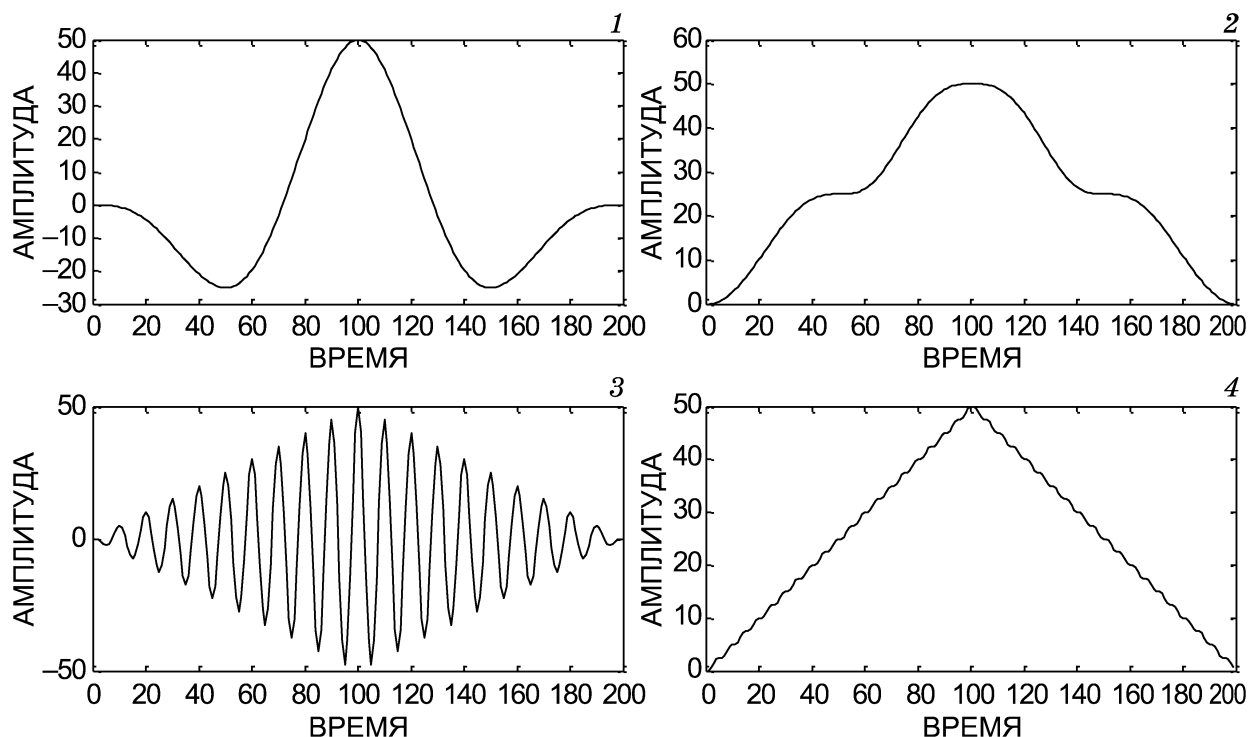


Рис. 8

Видимо, встречающееся в учебниках понятие «корреляционная обработка», или «коррелятор в оптимальном приёмнике», ближе к тому, что изображено на рисунке 8 (справа). То есть, используя стандартные программы, хотелось бы получить результат, изображенный справа, чтобы можно было использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье так, как это реализовано в Matlab. Но напрямую этого сделать не удастся.

Как видно на рисунке 8 (3), из-за изменения фазы сигнала при временном сдвиге, входящем в алгоритм корреляционной обработки, появляется переменная составляющая, которая отсутствует при квадратурной обработке. Значит, необходимо сделать функцию хсогт квадратурной. На рисунке 9 приведена программа, позволяющая это сделать, и результат её работы для одного и десяти периодов заданной частоты.

Как видно из рисунка, теперь результат работы двух алгоритмов одинаков. Значит, всё, что удастся получить при моделировании в Matlab, можно будет реализовать на практике любым удобным способом.

В тексте закомментирован вариант программы, позволяющий получить почти такой же результат другим способом, но первый вариант, по сути, ближе к приведённым ранее схемам.

Корреляционную функцию сигнала часто используют для точного определения времени прохождения сигнала в пространстве, что позволяет определять координаты взаимного расположения взаимодействующих объектов. Чем точнее можно это сделать, тем лучше и выше разрешающая способность сигнала.

Например, если использовать корреляционную функцию одного периода частоты 10 кГц, то в гидроакустике можно получить точность порядка 0,3 м, что соответствует времени 200 мкс, это ширина корреляционной функции.

Из приведённых графиков видно, если при формировании сигнала используется целое число периодов определённой частоты, то корреляционная функция не имеет боковых лепестков. Соответственно сигнал не должен иметь длительность меньше одного периода. Чем выше используется частота, тем меньше длительность одного периода, тем больше может быть получена разрешающая способность. Но чем меньше длительность сигнала, тем меньше его энергия, поэтому на практике применяются более сложные сигналы, позволяющие увеличить энергию. Тем не менее, на малых дальностях часто используют простейший сигнал, состоящий из целого числа периодов выбранной частоты.

```

t = 0:99;
Fs = 10000;

x1 = sin(2*pi*100*t/Fs);
x10 = sin(2*pi*1000*t/Fs);

y1 = cos(2*pi*100*t/Fs);
y10 = cos(2*pi*1000*t/Fs);

U = xcorr(x1);
U1 = xcorr(x1,y1);
U2 = sqrt(U.^2+U1.^2);
%U2 = abs(hilbert(U));
U3 = xcorr(x10);
U4 = xcorr(x10,y10);
U5 = sqrt(U3.^2+U4.^2);
%U5 = abs(hilbert(U3));
subplot(2,1,1); plot(U2)
subplot(2,1,2); plot(U5)

```

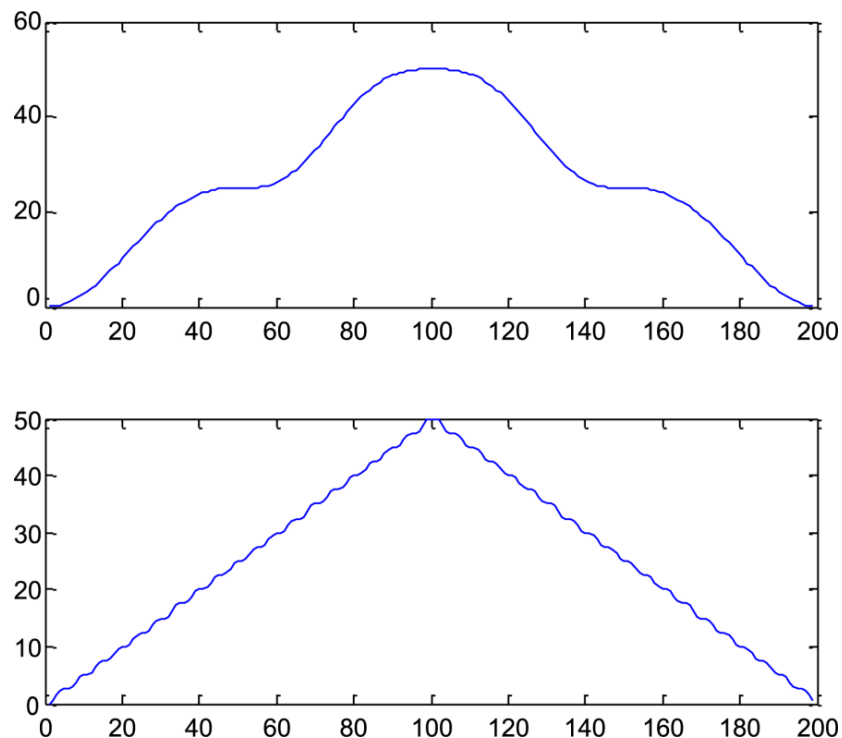


Рис. 9

При формировании сложных сигналов очень часто используется фазовая манипуляция. Если использовать её простейшую форму, фазовый сдвиг на 180° , то квадратурная корреляция позволит легко принять такой сигнал. На рисунке 10 приведён пример фазоманипулированного сигнала с использованием кода Баркера и результат его приёма.

```

t = 0:99;
Fs = 10000;

x2 = sin(2*pi*200*t/Fs);
y2 = cos(2*pi*200*t/Fs);

X = [x2 x2 x2 x2 x2 -x2 -
x2 x2 x2 -x2 x2 -x2 x2];
Y = [y2 y2 y2 y2 y2 -y2 -
y2 y2 y2 -y2 y2 -y2 y2];
U = xcorr(X);
U1 = xcorr(X,Y);
U2 = sqrt(U.^2+U1.^2);
subplot(2,1,1); plot(X)
subplot(2,1,2);
plot(U2)

```

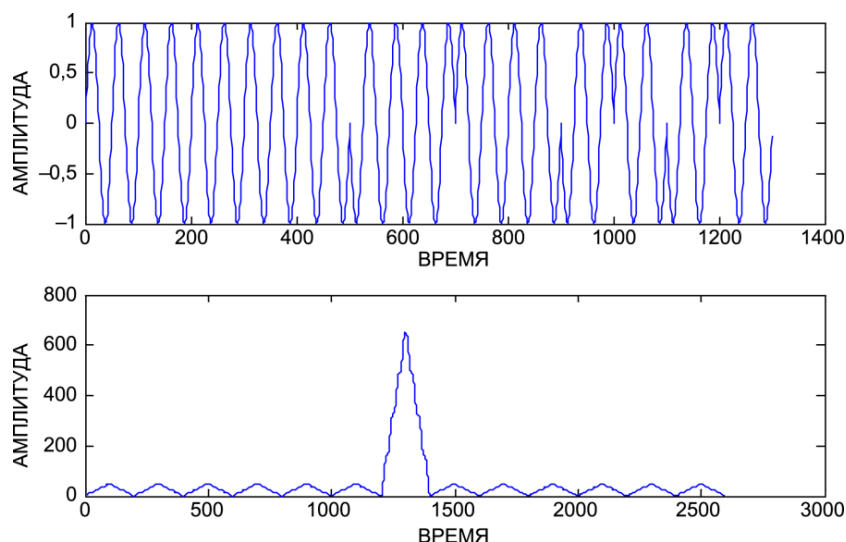


Рис. 10

Как видно на рисунке 10, сигнал сформирован из 13 элементарных фрагментов, состоящих из двух периодов каждый. Элементарный фрагмент, в дальнейшем будем называть его «чип», определяет структуру сигнала и не может иметь длительность меньше одного периода колебания выбранной частоты. Понятно, что в этом случае разрешающая способность сигнала не может быть лучше, чем если бы мы использовали просто один период этой же частоты. Поэтому длительность одного периода является хорошим ориентиром при оценке возможности получения сигнала с максимально возможной разрешающей способностью.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru