

Таганрогский радиотехнический университет

Кафедра РТС

Лабораторная работа

**Формирование и обработка сложных сигналов
в защищенных системах связи**

Таганрог
2006

1.1 Применение сложных (широкополосных) сигналов в защищенных системах связи

1.1.1 Общая характеристика сложных (широкополосных) сигналов

Сложными (широкополосными) сигналами называют класс сигналов, для которых выполняется соотношение $B = F_c T_c \gg 1$, где F_c и T_c – соответственно ширина спектра и длительность сигнала. Расширение спектра сигнала достигается за счет дополнительной модуляции сигнала (как правило, фазовой или частотной). Таким образом, широкополосный сигнал имеет сложную внутреннюю структуру, чем и объясняется другое название таких сигналов – сложные сигналы. При приеме сложные сигналы могут быть сжаты по времени или по спектру с соответствующим увеличением амплитуды или спектральной плотности сигнала. Величину B называют базой сигнала. Она показывает во сколько раз сложный сигнал можно сжать по времени или по спектру и, соответственно, увеличить амплитуду или спектральную плотность сигнала.

Сложные сигналы обладают рядом замечательных свойств:

они позволяют обеспечить “подпомеховую” передачу информации через канал связи (т.е. передавать сигналы, мощность которых ниже мощности помех в канале связи);

прием сложного сигнала возможен только устройством, согласованным с этим сигналом, следовательно, необходимо располагать информацией о внутренней структуре такого сигнала;

сложные сигналы позволяют обеспечить одновременную беспомеховую работу в одном частотном диапазоне большого количества абонентов системы связи.

Переоценить значение двух первых факторов для решения задач защиты информации в функциональных каналах передачи информации за пределами контролируемой зоны очень трудно. “Подпомеховая” передача сообщений затрудняет обнаружение самого факта передачи сообщения, а это снижает вероятность перехвата сигнала, передаваемого по функциональному каналу связи. Сложность структуры сигнала затрудняет его несанкционированный прием, поскольку согласованный прием такого сигнала возможен только, если злоумышленнику известна его структура.

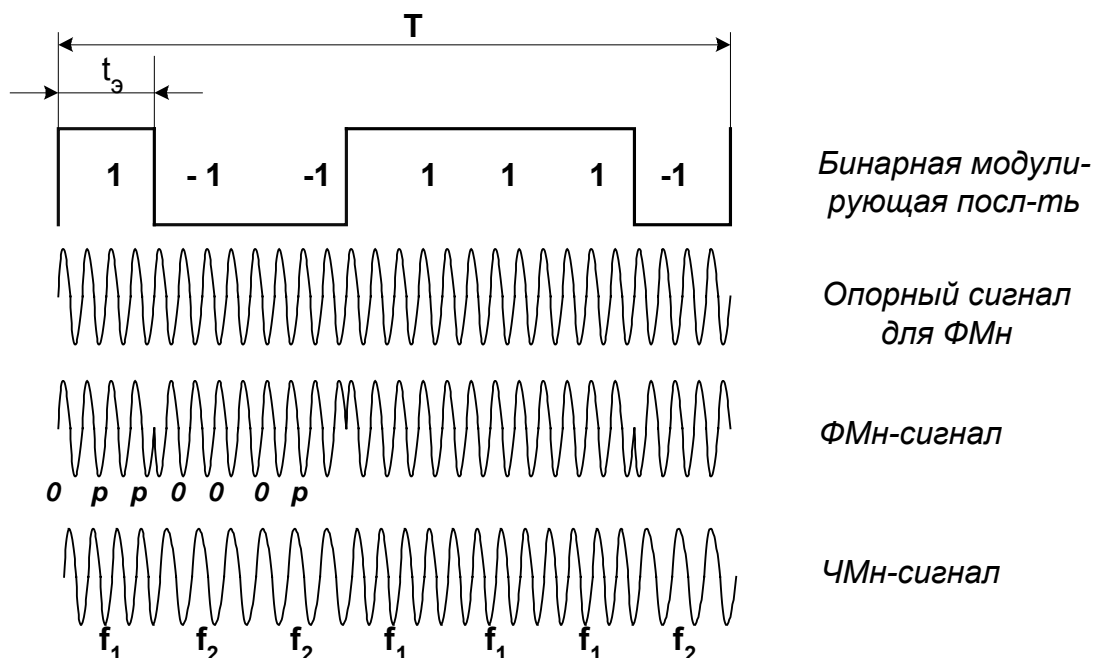


Рис. 1. Временные диаграммы бинарно-модулированных широкополосных сигналов

Эти свойства сложных сигналов делают их весьма перспективным средством для построения защищенных корпоративных систем связи, а также для обеспечения одновременной работы абонентов в одном частотном диапазоне без взаимных помех. В качестве примера при-

менения сложных сигналов в защищенных системах связи можно указать на системы связи стандарта CDMA.

В системах связи наиболее широко применяются сложные сигналы, получаемые путем фазовой (ФМн) или частотной (ЧМн) модуляции (манипуляции) гармонического колебания некоторой бинарной (двоичной) последовательностью. Эта бинарная последовательность не является информационной в том смысле, что она не несет информации о передаваемом сообщении, она используется лишь для расширения спектра носителя информации. Временные диаграммы таких сигналов представлены на рис.1.

Ширина спектра рассматриваемых сигналов определяется, в основном, длительностью t_s элемента кода модулирующей последовательности:

$$F_{\text{ФМн}} \approx 2/t_s \quad \text{для ФМн-сигнала,}$$

$$F_{\text{ЧМн}} \approx \begin{cases} 2/t_s + |f_1 - f_2| & \text{при } |f_1 - f_2| < 2/t_s \\ 4/t_s & \text{при } |f_1 - f_2| > 2/t_s \end{cases} \quad \text{для ЧМн-сигнала.}$$

Таким образом, база рассматриваемых сигналов

$$B = \frac{(2 \div 4)}{t_s} T = (2 \div 4) N,$$

где $N=T/t_s$ – число элементов (длина) бинарной модулирующей последовательности.

1.1.2. Особенности приема широкополосных сигналов

Алгоритм оптимального приема сигнала на фоне аддитивного гауссова шума предписывает вычисление корреляционного интеграла $u(T)$ и сравнение его с некоторым порогом u_0 .

$$u(T) = \int_t^{t+T} y(t)s_{on}(t)dt \geq u_0, \quad (1)$$

где $y(t)$ – принимаемый сигнал, который представляет собой либо аддитивную смесь сигнала $s(t)$ и гауссова шума $n(t)$ либо просто гауссов шум, а $s_{on}(t)$ – опорный сигнал, представляющий собой копию сигнала $s(t)$, которая генерируется в корреляционном приемнике.

Таким образом, оптимальный приемник должен в той или иной форме вычислять значение корреляционного интеграла (1) в момент окончания сигнала и сравнивать его с порогом.

Из теории оптимального приема известно два способа вычисления $u(T)$: непосредственно по формуле (1) или с помощью линейного согласованного фильтра – линейного фильтра, импульсная характеристика $g_{cf}(t)$ которого является зеркальным отображением сигнала $s(t)$ относительно оси ординат. В частотной области комплексный коэффициент передачи $\dot{K}_{cf}(j\omega)$ согласованного фильтра является функцией, комплексно сопряженной со спектром $\dot{S}(j\omega)$ принимаемого сигнала.

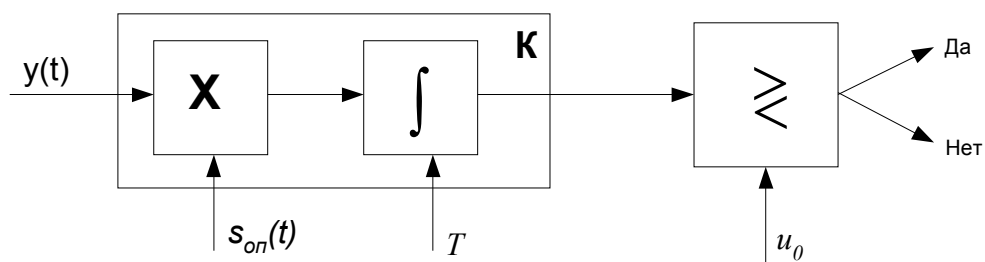
$$\dot{K}_{cf}(j\omega) = \dot{S}^*(j\omega).$$

Выходной сигнал согласованного фильтра можно выразить через интеграл Дюамеля

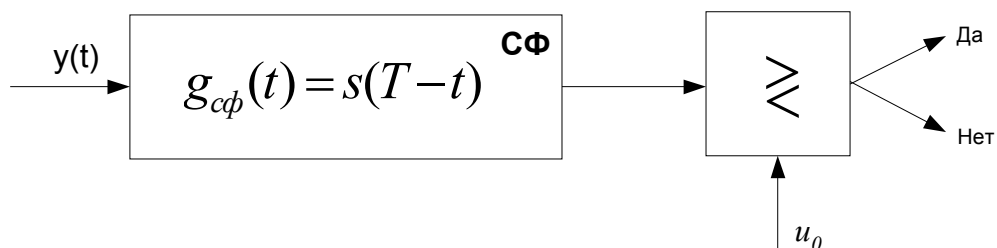
$$u(T) = \int_{t-T}^t y(\tau)g_{cf}(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) определяют два способа вычисления $u(T)$, называемые в теории оптимального приема корреляционным приемом и согласованной фильтрацией. Структурные схемы устройств, реализующих эти способы, представлены на рис.2.

Рассмотрим, к примеру, оптимальную обработку ФМн-сигнала с помощью корреляционного приемника. Предположим, что шум на входе приемника отсутствует, т.е. $y(t)=As(t)$. Тогда после перемножения $y(t)$ и $s_{on}(t)$ в корреляционном приемнике сигнал на входе интегратора будет представлять собой сумму двух сигналов: постоянного напряжения u_c и гармонического сигнала удвоенной частоты. $u_{2\omega}$ (рис. 3). На выходе интегратора первое слагаемое окажется равным нулю (если t_s кратно $2\pi/\omega$) либо близким к этому значению (когда указанное условие не выполняется), следовательно в момент окончания входного сигнала при $t=T$ $u(T)=AT$.



а) Коррелятор



а) Согласованный фильтр

Рис. 2. Структура оптимальных приемников

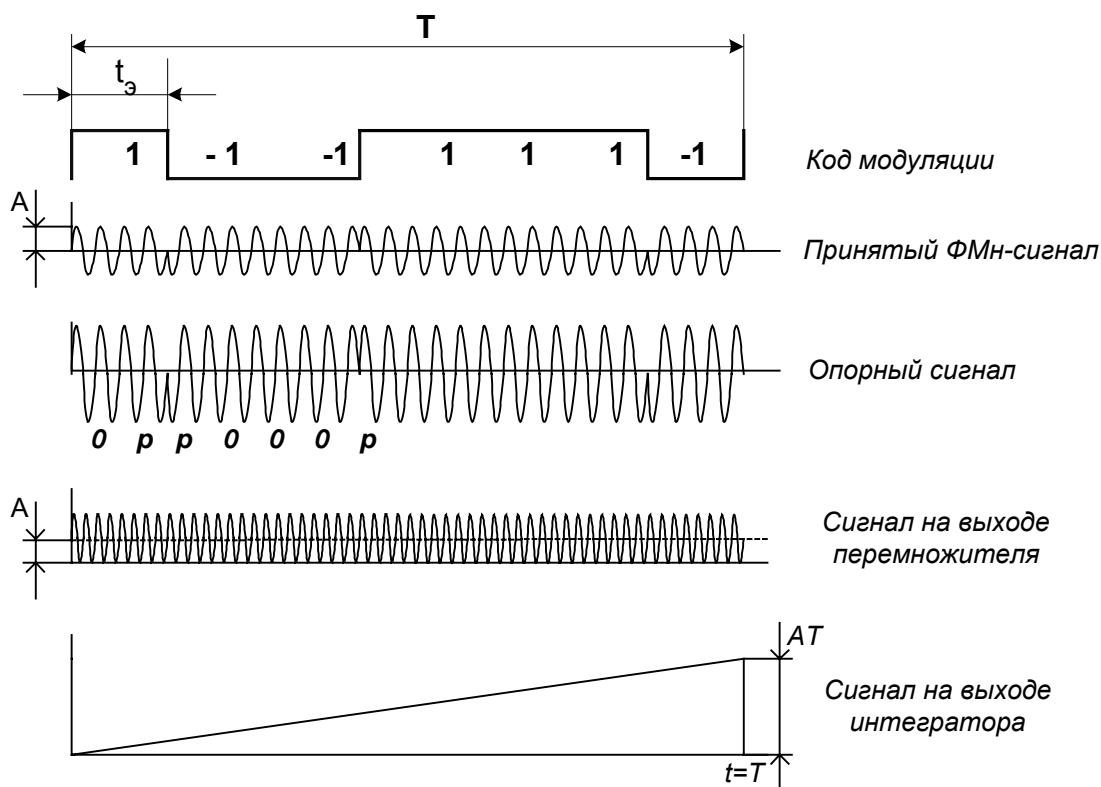


Рис. 3. Временные диаграммы для коррелятора

Из приведенных на рис.3 временных диаграмм следует, что с помощью коррелятора сложный сигнал может быть сжат по спектру. Действительно сигнал на выходе перемножителя является суммой двух сигналов: прямоугольного импульса длительностью T и отрезка гармонического сигнала той же длительности. Ширина спектра первого сигнала $\approx 1/T$, а ширина спектра второго $\approx 2/T$, т.е. в N раз меньше спектра ФМн-сигнала, поскольку $T=Nt_{\text{э}}$. Для сжатия ФМн-сигнала по спектру можно перемножить принимаемый сигнал с копией бинарной кодовой по-

следовательности, которой модулировался переданный сигнал. В результате этого внутриимпульсная модуляция будет устранена, и спектр сигнала сузится (рис. 4).

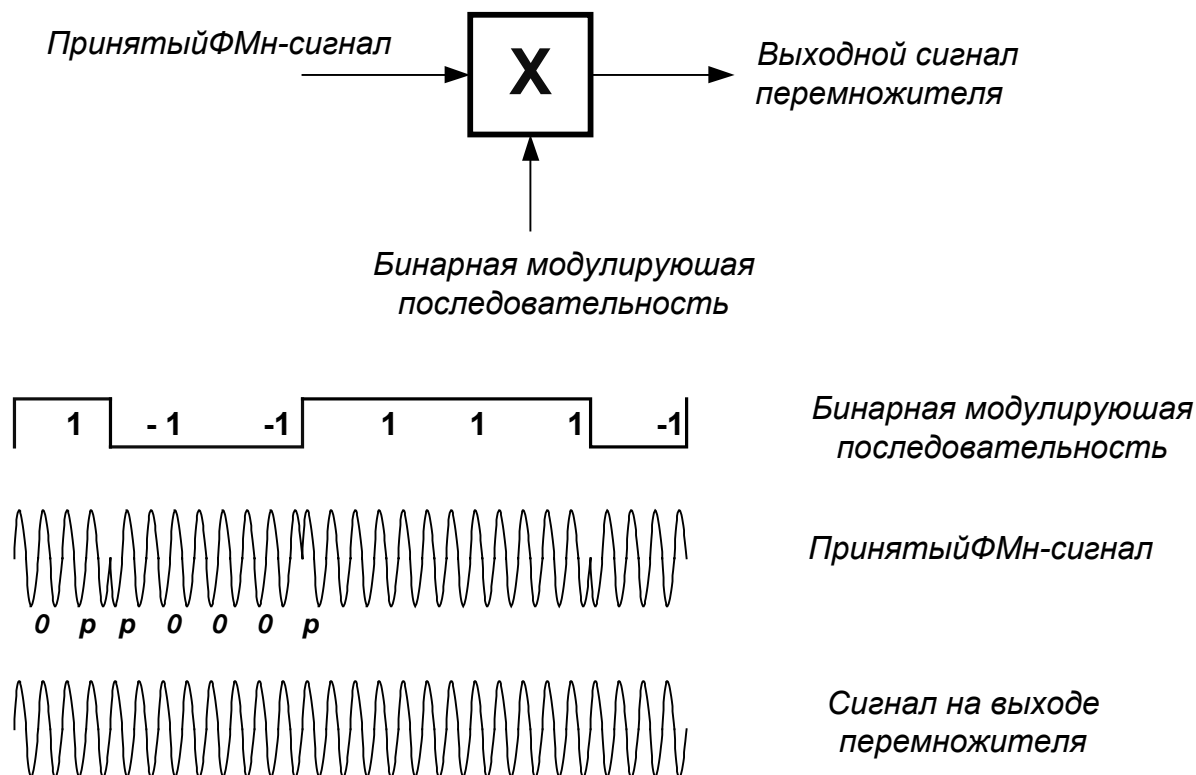


Рис.4. Сжатие сложного сигнала по спектру

Оптимальный прием сложного с помощью согласованного фильтра приводит к его сжатию во времени. Рассмотрим эти процессы также на примере ФМн-сигнала. Согласованный фильтр для ФМн-сигнала можно реализовать на линии задержки с отводами, интервал задержки между которыми выбирается равным длительности элемента сигнала t_s (рис.5). Отводы линии задержки подключают через усилители с коэффициентом передачи a_i к входам сумматора. Набор коэффициентов a_i устанавливают в зависимости от вида бинарной модулирующей последовательности: он должен быть таким, чтобы импульсная характеристика согласованного фильтра была зеркальным отражением ФМн-сигнала с которым согласован фильтр. В момент окончания сигнала задержанные на интервалы времени, кратные t_s и умноженные на коэффициенты a_i сигналы с отводов линии задержки оказываются сфазированными, и в результате их суммирования амплитуда сигнала на выходе согласованного фильтра возрастет в N раз. В реальных устройствах на работу согласованного фильтра влияет целый ряд дополнительных факторов, наиболее существенными из которых являются полоса пропускания канала связи и уровень помех в канале.

Наиболее сложной технической проблемой при реализации рассмотренного согласованного фильтра является построение прецизионной многоотводной линии задержки: точность выполнения отводов должна обеспечивать погрешность задержек не более 4-6 % от периода опорного гармонического сигнала, что является весьма жестким требованием. Поэтому часто согласованную фильтрацию выполняют после фазового детектирования ФМн-сигнала на видеочастотах. В этом случае в качестве линии задержки можно использовать их дискретные аналоги – тактируемые сдвиговые регистры.

Вид бинарной модулирующей последовательности оказывает существенное влияние на величину побочных максимумов сигнала на выходе согласованного фильтра. ВК настоящему времени известны кодовые последовательности Баркера с $N \leq 13$, применение которых обеспечивает величину побочных максимумов, не превышающую $1/N$ []. В системах связи основным требованием к бинарным кодовым последовательностям является возможность обеспечения одновременной беспомеховой работы в одном частотном диапазоне большого количества абор-

нентов. Этим требованиям удовлетворяет множество бинарных ортогональных последовательностей. В этом случае в отсутствие шума корреляционный интеграл (1) будет равен нулю, если $y(t)$ содержит сигнальную составляющую $s(t)$, отличающуюся от $s_{on}(t)$. Например, система мобильной связи CDMA использует в качестве бинарных модулирующих последовательностей множество 64 разрядных функций Уолша. Для защищенных систем связи является актуальной поиска систем дискретных ортогональных последовательностей, не описанных в литературе.

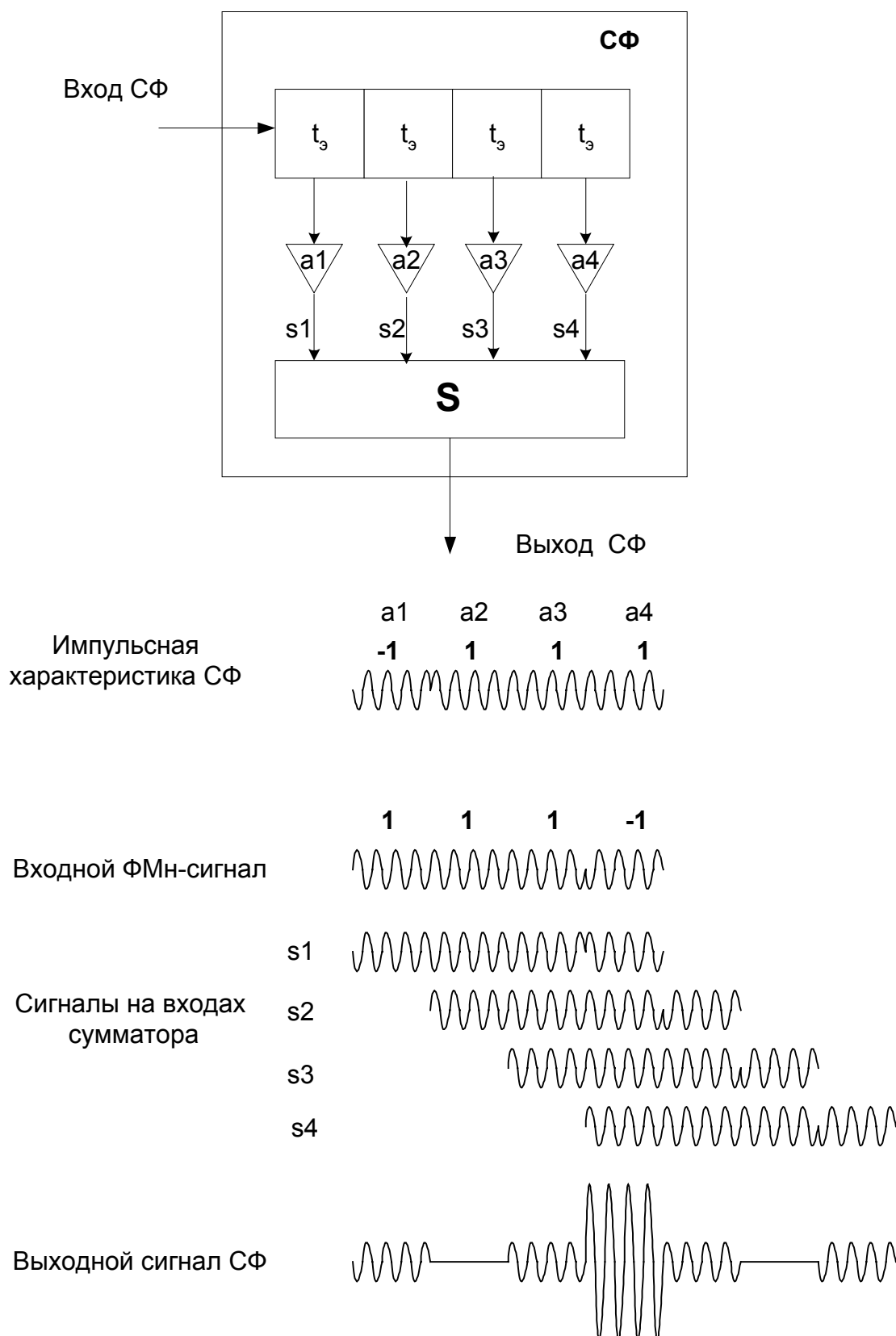


Рис. 5 Согласованный фильтр для ФМн-сигнала

2. Домашняя подготовка

1. Изучить способы расширения спектра сигналов и способы их приема.
2. Изобразить структуру ФМн-сигнала, используя в качестве бинарной последовательности один из кодов Баркера. Найти для него структуру оптимального приемника и согласованного фильтра. Пояснить их работу временными диаграммами.
3. Построить широкополосный сигнал на основе ЛРП, используя в качестве ЛРП М-последовательность и произвольную ЛРП, найти структуру согласованного фильтра. Проиллюстрировать работу согласованного фильтра временными диаграммами.

3. Лабораторное задание

1. Лабораторное исследование выполняется с помощью программы Sl_Sig, которая позволяет исследовать обработку ФМн-сигналов на несущей частоте, а также последетекторную обработку сложных сигналов с помощью дискретных линий задержки. С помощью программы моделируются соответствующие сигналы и согласованные фильтры. Дополнительно к этому в программе предусмотрена возможность исследовать влияние параметров канала связи (его полосы пропускания и шумовых характеристик) на качество приема сложного сигнала.
2. Загрузить программу Sl_Sig.exe в память ЭВМ, изучить ее интерфейс и правила проведения исследований.
3. Исследовать обработку ФМн-сигналов на несущей частоте. Для этого установить в формирователе сигнала структуру бинарной модулирующей последовательности Баркера, использованную при домашней подготовке, согласовать с ней фильтр и зафиксировать временные диаграммы на входах сумматора и выходе согласованного фильтра. Расстроить согласованный фильтр относительно сигнала (изменить один из масштабных коэффициентов a_i) и снова зафиксировать сигналы в контрольных точках согласованного фильтра. Изменить еще один из коэффициентов a_i и вновь зафиксировать изменение вида сигналов в контрольных точках. Определить допустимую степень расстройки согласованного фильтра относительно сигнала. Изменяя полосу пропускания канала связи и его шумовые характеристики пронаблюдать изменение формы сигнала на выходе согласованного фильтра и сделать выводы.
4. Провести исследования, указанные в п.4 если в качестве бинарной модулирующей последовательности используется М-последовательность длины 7. Сделать выводы.
5. Исследовать последетекторную обработку сложных сигналов. Для этого установить в формирователе ЛРП структуру М-последовательность, использованную при домашней подготовке, согласовать с ней дискретный согласованный фильтр (ДСФ) и зафиксировать временные диаграммы на входах сумматора и выходе ДСФ. Расстроить ДСФ относительно сигнала (изменить один из масштабных коэффициентов a_i) и снова зафиксировать сигналы в контрольных точках. Изменить еще один из коэффициентов a_i и вновь зафиксировать изменение вида сигналов в контрольных точках. Определить допустимую степень расстройки ДСФ относительно сигнала. Повторить описанный эксперимент для произвольной ЛРП. Сопоставить результаты.
6. Оформить отчет по работе и сделать выводы по работе.

4 Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать:

- а) результаты выполнения домашнего задания: временные диаграммы сигналов и структуры согласованных фильтров.
- б) результаты выполнения лабораторного задания: сопоставление теоретических и экспериментальных результатов;
- в) анализ результатов работы и выводы по ней.

5 Контрольные вопросы

1. Каким образом можно расширить спектр сигнала? От чего зависит степень сжатия сигнала по времени и по спектру? Почему широкополосные сигналы называют сложными и шумо-

подобными? Каким образом можно использовать широкополосные сигналы для защиты информации в системах связи?

2. Какие виды широкополосных сигналов вы знаете? Какие требования предъявляются к бинарным модулирующим последовательностям в системах связи? Поясните принципы их выбора на примерах.

3. Какие способы приема широкополосных сигналов известны вам? Поясните принцип сжатия сигнала по спектру. Изобразите структурную схему такого приемника и поясните его работу.

4. Каким образом строится согласованный фильтр для приемника сложного сигнала? Поясните принцип построения примерами.

5. Как влияют на прием сложного сигнала параметры канала связи? От чего зависит допустимое отношение сигнал/шум при приеме сложного сигнала?

6. Как влияет расстройка согласованного фильтра относительно сигнала на качество приема сложного сигнала? Какая расстройка является допустимой? От чего она зависит?

7. Изобразите варианты структурных и функциональных схем формирователей сложных сигналов. Какие проблемы могут возникнуть при их технической реализации?

8. Изобразите варианты структурных и функциональных схем согласованных фильтров для приема ФМн- сигналов при их обработке на несущей частоте и последетекторной обработке. Какие проблемы могут возникнуть при их технической реализации?

9. Изобразите варианты структурных и функциональных схем приемников со сжатием спектра для приема ФМн- сигналов. Какие проблемы могут возникнуть при их технической реализации?

10. Приведите примеры бинарных ортогональных последовательностей и изобразите структурные схемы устройств для их формирования и обработки сигналов, использующих данные последовательности.

Литература

1. Петрович Н.Т. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М: Сов. Радио, 1972
2. Варакин Л.Е. Сложные сигналы. - Сов. Радио, 1985.
3. Кочемасов Формирование сложных сигналов. – М.: Радио и связь, 1982
4. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. - М: Сов. Радио, 1974