

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Радиотехнический факультет (РТФ)

Кафедра средств радиосвязи (СРС)

В.А. Кологривов

**Исследование методов аналоговой модуляции радиосигналов на
функциональном уровне**

Учебно-методическое пособие
по лабораторным работам
и самостоятельной работе над дисциплиной
для студентов радиотехнических специальностей
в среде функционального моделирования **Simulink**
системы **MatLab**

2012

Кологривов В.А.

Исследование методов аналоговой модуляции радиосигналов на функциональном уровне: Учебно-методическое пособие по лабораторным работам и самостоятельной работе над дисциплиной для студентов радиотехнических специальностей в среде функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab** – Томск: ТУСУР. Образовательный портал, 2012. – 62 с.

Учебное методическое пособие содержит теоретический материал по аналоговым методам модуляции сигналов в радиосвязи и вещании, фрагмент научно технического отчета по исследованию аналоговых модемов в среде функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab**, описание лабораторных заданий по исследованию аналоговой модуляции и методические указания к самостоятельной работе по освоению дисциплины: теоретический материал (лекции), практические занятия, лабораторные занятия, курсовое проектирование.

Пособие предназначено для студентов очной формы обучения высшего профессионального образования, по направлениям: «Радиотехника», «Телекоммуникации» и др.

© Кологривов В.А., 2012
© ТУСУР, РТФ, каф. СРС, 2012 г.

АННОТАЦИЯ

Цикл лабораторных работ **«Исследование методов аналоговой модуляции радиосигналов на функциональном уровне»** посвящен модельному исследованию классических методов аналоговой модуляции с использованием пакета функционального моделирования **Simulink** системы для инженерных и научных расчетов **MatLab**.

В пособии приведены краткие теоретические сведения по методам аналоговой модуляции и демодуляции радиосигналов, представлены функциональные модели для исследований, сформулированы задания, определены требования к отчетам, приведены контрольные вопросы, ответы на которые необходимы для допуска и успешной защиты лабораторной работы. В заключение приведены методические указания по самостоятельной работе над дисциплиной: лекционные, практические, лабораторные занятия и курсовая работа/проект.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение. Цели и задачи лабораторного цикла	5
2 Классические методы аналоговой модуляции и демодуляции радиосигналов	6
3. Модельное исследование методов аналоговой модуляции (фрагмент н/г отчета)	18
4. Цикл лабораторных работ по аналоговым методам модуляции. лабораторные задания	47
4.1. Лабораторная работа №1 – Исследование модема с амплитудной модуляцией (AM)	49
4.2. Лабораторная работа №2 – Исследование модема с балансной амплитудной модуляцией (DSB)	51
4.3. Лабораторная работа №3 – Исследование модема с квадратурной амплитудной модуляцией (SSB)	52
4.4. Лабораторная работа №4 – Исследование модема с фазовой модуляцией (PM)	54
4.5. Лабораторная работа №5 – Исследование модема с частотной модуляцией (FM)	56
5. Краткие методические рекомендации по организации самостоятельной работы над дисциплиной (лекции, практические и лабораторные занятия, курсовая работа/проект)	58
Список рекомендуемой литературы	61

1 ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОГО ЦИКЛА

Подготовка студентов по направлению “Инфокоммуникационные технологии и системы связи” предполагает начальное знакомство на функциональном (системном) уровне с классическими аналоговыми методами модуляции и демодуляции радиосигналов, которые ранее интенсивно использовались как в радиосвязи так и в радиовещании. В настоящее время, в связи с переходом на цифровые технологии в радиосвязи и радиовещании, в основном используются более эффективные методы цифровой манипуляции (модуляции).

Информационное сообщение в приемно-передающем тракте представляют собой низкочастотный электрический сигнал в виде напряжения или тока, полученных с первичных датчиков информации, например с микрофона, адаптера звукоснимателя, фотодиода, передающей телевизионной трубки и так далее.

Традиционные радиосигналы представляют собой высокочастотное электромагнитное излучение с параметрами (амплитуда, частота и фаза), изменяющимися сообразно передаваемым ими информационным сообщениям (голоса, изображения, телеметрических данных). Напомним, что скорость распространения электромагнитного поля в атмосфере составляет порядка $c \approx 3 \cdot 10^8$ [м/с]. Отметим, что частотный диапазон информационных сообщений $\Delta F \approx$ [единицы герц ÷ единицы мегагерц], а для эффективного приема или излучения радиосигнала геометрические размеры элементов конструкций антенн должны быть соизмеримы с четвертью длины волны подводимого электрического сигнала. Приемная антенна преобразует падающую (наведенную) электромагнитную волну в высокочастотный модулированный электрический сигнал в виде напряжения или тока соответствующего частотного диапазона. Передающая антенна преобразует подводимый, в виде напряжения или тока, высокочастотный модулированный электрический сигнал в электромагнитную волну, излучаемую в пространство. Например, если попытаться излучить в пространство информационный электрический сигнал с центральной частотой спектрального диапазона порядка $f_0 = 100$ кГц, то длина волны электромагнитного излучения окажется порядка $\lambda = c/f_0 = 3 \cdot 10^8$ [м/с]/ $100 \cdot 10^3$ [Гц] ≈ 3 [км], то есть размеры элементов конструкций антенны должны быть порядка $\lambda/4 = 3$ [км]/ $4 \approx 750$ [м], что уже не реально.

В связи с этим стараются спектр излучаемого сигнала перенести вверх по частотному диапазону волн, что не только позволит снизить размеры излучающих и принимающих антенн до приемлемых, но и использовать неперекрывающиеся по частоте спектральные диапазоны для других информационных сообщений. Для переноса частотного спектра

используются преобразователи частоты, представляющие собой нелинейное устройство – преобразователь, на один вход которого подается высокочастотное (несущее) колебание с опорного генератора (гетеродина), а на другой вход низкочастотный электрический сигнал информационного сообщения.

На функциональном уровне преобразователи представляют собой перемножители электрических сигналов опорного генератора несущего колебания и информационного сообщения. В результате преобразования частотный диапазон информационного сообщения расширяется вдвое и переносится в спектральную область с несущей частотой в центре. При этом образуются, так называемые “верхние” и “нижние” боковые составляющие (поддиапазоны), содержащие суммарные и разностные комбинационные частоты несущего колебания и гармоник информационного сигнала убывающие по амплитуде с ростом номера гармоники.

Процесс переноса информационного диапазона в область частоты несущего колебания называется **преобразованием частоты**, а образование “верхнего” и “нижнего” поддиапазонов (составляющих), обусловленных изменением параметров несущего колебания под действием информационного сигнала – **модуляцией**. В зависимости от того на изменение какого параметра несущего колебания воздействовал преобразователь-модулятор различают – или амплитудно-, или частотно- или фазо- модулированные радиосигналы. Вид модуляции определяет такие важные параметры радиосигнала как: энергетическая и спектральная эффективность и помехоустойчивость.

Отечественная и международная символики обозначения типов аналоговой модуляции сигналов: АМ- (амплитудно-модулированные) – **Amplitude Modulation (AM)**; АМ с подавленной несущей (балансная амплитудная модуляция) - **Double Side Band (DSB)**; ОМ- (однополосная амплитудная модуляция) или АМ-ОБП- (амплитудная модуляция с одной боковой полосой) – **Single Side Band (SSB)**; ФМ- (фазо-модулированные) – **Phase Modulation (PM)**; ЧМ- (частотно-модулированные) – **Frequency Modulation (FM)**; КАМ- (квадратурно- амплитудно- модулированные) или АФМ- (амплитудно-фазовая модуляция) – **Quadrature Amplitude Modulation (QAM)** и другие.

2 КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛОГОВОЙ МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ

Рассмотрим простейший вид высокочастотного гармонического колебания

$$v(t) = V_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$$

или

$$v(t) = V_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0),$$

где V_0 - амплитуда (модуль максимального значения); $\cos()$, $\sin()$ - форма гармонического колебания; $\omega_0 \cdot t + \varphi_0$ - полная фаза гармонического колебания (аргумент тригонометрической функции) [радиан или градус]; φ_0 - начальная фаза колебания; $\omega_0 \cdot t$ - линейно изменяющаяся со временем фаза; t - время [секунда]; $\omega_0 = 2 \cdot \pi / T = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ - циклическая (круговая) частота несущего колебания [радиан/секунда]; π - константа (отношение длины окружности к её диаметру); T - период колебания [секунда]; $f_0 = 1/T$ - частота – число периодов колебания в секунду [Герц].

Заметим принципиально, что **текущая (мгновенная) частота** представляет собой производную зависимости фазы от времени $\omega(t) = \varphi'(t)$. Так, при линейном законе изменения фазы $\varphi(t) = \omega_0 \cdot t + \varphi_0$, имеем постоянную круговую частоту колебания $\omega(t) = \varphi'(t) = \omega_0$. В свою очередь, **текущая (мгновенная) фаза** представляет собой неопределенный интеграл зависимости частоты от времени $\varphi(t) = \int \omega(t) \cdot dt$. Так, при постоянной частоте колебания имеем линейную фазу от времени $\varphi(t) = \int \omega_0 \cdot dt = \omega_0 \cdot t$.

При использовании высокочастотного гармонического колебания в качестве несущего, амплитуда $V(t)$, или частота $\omega(t)$, или фаза $\varphi(t)$, представляют собой функции времени, определяемые модулирующим сигналом $U(t)$ (информационным сообщением). При этом негласно предполагается, что модулирующий сигнал нормирован по амплитуде к единице $|U(t)| \leq 1$. Кроме того, поскольку текущая частота определяет текущую фазу, а текущая фаза – текущую частоту, то модуляция частоты вызывает модуляцию фазы и наоборот. Иначе говоря, модуляция фазы сопровождается модуляцией частоты, а модуляция частоты – модуляцией фазы. В связи с этим частотная и фазовая модуляции образуют класс **угловой модуляции**.

В качестве простейшего модулирующего сигнала обычно рассматривают гармоническое колебание вида $U(t) = U_0 \cdot \cos(\Omega \cdot t + \theta_0)$ или $U(t) = U_0 \cdot \sin(\Omega \cdot t + \theta_0)$ (однотональная модуляция), где U_0 - амплитуда модулирующего сигнала; $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot F$ - циклическая (круговая) частота низкочастотного модулирующего колебания; F - частота модулирующего однотонального колебания; θ_0 - начальная фаза модулирующего колебания. Для упрощения выкладок и соблюдения условия нормировки положим амплитуду модулирующего сигнала равной единице $U_0 = 1$ и пренебрежем начальной фазой модулирующего сигнала θ_0 , то есть, положим $U(t) = \cos(\Omega \cdot t)$ или $U(t) = \sin(\Omega \cdot t)$.

Замечание. С целью упрощения векторной интерпретации модулированных радиосигналов удобно при АМ- модуляции несущее колебание и однотональный модулирующий сигнал представить в виде

$$v(t) = V_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0),$$

$$U(t) = \cos(\Omega \cdot t),$$

а при ФМ- и ЧМ- модуляциях несущее колебание и однотоновый модулирующий сигнал использовать в виде

$$v(t) = V_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0),$$

$$U(t) = \sin(\Omega \cdot t).$$

АМ, ФМ, ЧМ. С учетом сделанного замечания дадим математическое описание амплитудной, фазовой и частотной модуляций при однотоновой модуляции. В этом случае амплитуда, фаза и частота несущего колебания могут быть представлены в виде

$$V(t) = V_0 + \Delta V \cdot \cos(\Omega \cdot t) = V_0 \cdot [1 + \Delta V/V_0 \cdot \cos(\Omega \cdot t)] =$$

$$= V_0 \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t)],$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t),$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t),$$

где V_0 - амплитуда несущего колебания; φ_0 - , ω_0 - постоянные составляющие (начальные значения) фазы и частоты; ΔV -, $\Delta\varphi$ -, $\Delta\omega$ - диапазоны изменения параметров модуляции (девиации) по амплитуде, фазе и частоте; $m_a = \Delta V/V_0$ - коэффициент (индекс) амплитудной модуляции.

Заметим, что применительно к амплитудной модуляции $V(t)$ есть **оггибающая** амплитудно-модулированного несущего колебания. При фазовой модуляции к постоянной φ_0 и линейной $\omega_0 \cdot t$ составляющим фазы несущего гармонического колебания добавляется переменная гармоническая составляющая $\Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)$ изменения фазы под действием модулирующего сигнала $U(t) = \sin(\Omega \cdot t)$. При частотной модуляции к постоянной частоте несущего колебания ω_0 добавляется переменная гармоническая составляющая $\Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)$ изменения частоты под действием модулирующего сигнала $U(t) = \sin(\Omega \cdot t)$.

Таким образом, при использовании косинусоидальной формы $\cos(\)$ для АМ несущего гармонического колебания (опорного генератора) и синусоидальной формы $\sin(\)$ для ФМ и ЧМ, амплитудно-, фазо- и частотно- модулированные несущие колебания можно записать в общем виде

$$v_{AM}(t) = V_0 \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t)] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0),$$

$$v_{PM}(t) = V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)],$$

$$v_{FM}(t) = V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)].$$

Так как при фазовой модуляции несущего колебания текущая частота является производной от текущей фазы

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \varphi'(t) = [\varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)]' = \\ &= \omega_0 + \Delta\varphi \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega \cdot t) = \omega_0 + m_\omega \cdot \cos(\Omega \cdot t), \end{aligned}$$

то эквивалентная форма частотно- модулированного несущего колебания при модуляции фазы может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} v_{FM}(t) &= V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \Delta\varphi \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega \cdot t)] = \\ &= V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t + m_\omega \cdot \cos(\Omega \cdot t)], \end{aligned}$$

где $m_\omega = \Delta\varphi \cdot \Omega$ - **индекс частотной модуляции** при модуляции фазы несущего колебания. Иными словами, *индекс частотной модуляции сопровождающей фазовую модуляцию колебания несущей **прямо** пропорционален частоте модулирующего колебания Ω при заданной девиации фазы $\Delta\varphi$.*

В свою очередь, при частотной модуляции несущего колебания текущая фаза определяется как неопределенный интеграл от текущей частоты

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \int \omega(t) \cdot dt = \int [\omega_0 + \Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \cdot dt = \\ &= \omega_0 \cdot t - \Delta\omega/\Omega \cdot \cos(\Omega \cdot t) = \omega_0 \cdot t - m_\varphi \cdot \cos(\Omega \cdot t), \end{aligned}$$

то эквивалентная форма фазо- модулированного несущего колебания при модуляции частоты может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} v_{PM}(t) &= V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t - \Delta\omega/\Omega \cdot \cos(\Omega \cdot t)] = \\ &= V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t - m_\varphi \cdot \cos(\Omega \cdot t)], \end{aligned}$$

где $m_\varphi = \Delta\omega/\Omega$ - **индекс фазовой модуляции** при модуляции частоты несущего колебания. Иными словами, *индекс фазовой модуляции сопровождающей частотную модуляцию колебания несущей **обратно** пропорционален частоте модулирующего колебания Ω при заданной девиации частоты $\Delta\omega$.*

Индексы модуляции. Сделаем несколько замечаний относительно понятий индексов модуляции по амплитуде, фазе и частоте.

Индекс или коэффициент модуляции по амплитуде $m_a = \Delta V/V_0$ представляет собой отношение величины девиации амплитуды к амплитуде исходного несущего колебания или среднему значению амплитуды несущего колебания (при однотоновой амплитудной модуляции отклонения амплитуды относительно среднего значения симметричны).

Можно определить коэффициент амплитудной модуляции из геометрических соображений. Как видим, модуль модулированного по амплитуде несущего колебания изменяется в пределах от

$$V_{max} = V_0 \cdot (1 + m_a)$$

до

$$V_{min} = V_0 \cdot (1 - m_a),$$

откуда легко получаем выражение для коэффициента амплитудной модуляции

$$m_a = (V_{max} - V_{min}) / (V_{max} + V_{min}) \leq 1.$$

Такое определение коэффициента или индекса амплитудной модуляции можно использовать и при несимметричных отклонениях амплитуды.

При частотной и фазовой модуляциях исходными являются понятия девиации фазы $\Delta\varphi$ и частоты $\Delta\omega$, однако, поскольку модуляция фазы всегда сопровождается девиацией частоты и наоборот, принято уровень сопровождающих модуляций оценивать индексами частотной $m_\omega = \Delta\varphi \cdot \Omega$ и фазовой $m_\varphi = \Delta\omega / \Omega$ модуляций.

Исследование зависимостей индекса модуляции от частоты модулирующего сигнала Ω при фиксированной девиации фазы $\Delta\varphi$ либо частоты $\Delta\omega$ позволяет установить, какой вид модуляции нами исследуется.

Спектральный состав модулированных сигналов. Исходное несущее гармоническое колебание имеет одну спектральную составляющую амплитудой V_0 , частотой ω_0 , и текущей фазой $\omega_0 \cdot t + \varphi_0$, где φ_0 - начальная фаза. Изменение амплитуды (формы огибающей), фазы или частоты при модуляции приводит к появлению новых составляющих в спектре несущего колебания. Предварительное исследование особенностей спектрального состава модулированных колебаний удобно проводить с использованием однотоновой модуляции $U(t) = \cos(\Omega \cdot t)$ при АМ и $U(t) = \sin(\Omega \cdot t)$ при ФМ и ЧМ.

Однотоновая АМ. Раскрывая скобки в выражении для АМ и используя тригонометрические преобразования

$$v_{AM}(t) = V_0 \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t)] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) =$$

$$= V_0 \cdot \left\{ \begin{array}{c} \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) + \\ + m_a/2 \cdot \cos[(\omega_0 - \Omega) \cdot t + \varphi_0] + m_a/2 \cdot \cos[(\omega_0 + \Omega) \cdot t + \varphi_0] \end{array} \right\},$$

получаем три составляющих однотонального АМ- колебания – на частоте несущего колебания ω_0 и на разностной $(\omega_0 - \Omega)$ и суммарной $(\omega_0 + \Omega)$ частотах несущего и модулирующего колебаний. Эти спектральные составляющие разностной и суммарной частот называются боковыми составляющими спектра модулированного колебания.

Таким образом, в результате изменения амплитуды несущего колебания V_0 по закону модулирующего сигнала $U(t)$ получаем АМ- радиосигнал.

Демодуляция АМ-сигнала. С целью демодуляции принятый модулированный радиосигнал перемножим с сигналом опорного генератора (гетеродина) приемника, совпадающего по частоте и фазе с опорным генератором передатчика, и получим

$$v_{AM}(t) = V_0 \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t)] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) =$$

$$= V_0/2 \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t)] \cdot \langle \cos[(0) \cdot t + 0] + \cos[2 \cdot (\omega_0 \cdot t + \varphi_0)] \rangle =$$

$$= V_0/2 \cdot [1 + m_a \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \langle 1 + \cos[2 \cdot (\omega_0 \cdot t + \varphi_0)] \rangle.$$

Далее сигнал подается на ФНЧ (преобразователь-перемножитель и интегратор-ФНЧ образуют детектор огибающей т.е. модулирующего сигнала) с целью фильтрации высокочастотных компонент $2 \cdot \omega_0$ преобразователя. Верхняя граничная частота ФНЧ выбирается равной верхней граничной частоте спектра модулирующего сигнала $U(t)$. В нашем случае однотонального модулирующего сигнала $U(t) = \cos(\Omega \cdot t)$ верхняя граничная частота ФНЧ выбирается равной частоте модулирующего сигнала Ω . После ФНЧ составляющая с частотой $2 \cdot \omega_0$ исчезает

$$v_{AM}(t) = V_0/2 \cdot [1 + m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t)]$$

и остается модулирующий сигнал с точностью до множителя $V_0 \cdot m_a/2$ и смещение постоянной составляющей на величину $V_0/2$. На выходе ФНЧ т.е. детектора огибающей можно поставить ФВЧ, в результате смещение (постоянная составляющая) исчезнет и принятый (продетектированный) сигнал (огибающая) с точностью до множителя будет совпадать с переданным информационным сигналом (сообщением)

$$v_{AM}(t) = V_0 \cdot m_a/2 \cdot \cos(\Omega \cdot t).$$

Способ приема (демодуляции) принятого модулированного радиосигнала путем его подачи на преобразователь (перемножитель), на второй вход которого подается сигнал с опорного генератора, совпадающего по частоте и фазе с сигналом опорного генератора передатчика, называется **прямым преобразованием спектра модулированного радиосигнала**.

Таким образом, путем прямого преобразования спектр модулированного радиосигнала переносится с центральной частоты несущего колебания ω_0 на нулевую частоту, после чего *низкочастотные боковые составляющие*, определяемые информационным сообщением, выделяются, а *высокочастотные составляющие*, появившиеся в результате преобразования, *подавляются* ФНЧ.

Однотональная ФМ. Учитывая, что при малой девиации $\Delta\varphi \ll 1$,

$$\cos[\Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \approx 1,$$

$$\sin[\Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \approx \Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t),$$

и используя тригонометрические преобразования

$$\begin{aligned} v_{PM}(t) &= V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)] = \\ &= V_0 \cdot \left\{ \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot \cos[\Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)] + \right. \\ &\quad \left. + \cos(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot \sin[\Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \right\} \approx \\ &\approx V_0 \cdot \left\{ \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot 1 + \right. \\ &\quad \left. + \cos(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot \Delta\varphi \cdot \sin(\Omega \cdot t) \right\} \approx \\ &\approx V_0 \cdot \left\{ \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) - \right. \\ &\quad \left. - \Delta\varphi/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 - \Omega) \cdot t] + \Delta\varphi/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 + \Omega) \cdot t] \right\}, \end{aligned}$$

получаем три составляющих однотонального ФМ- колебания – на частоте несущего колебания ω_0 и на разностной $(\omega_0 - \Omega)$ и суммарной $(\omega_0 + \Omega)$ частотах несущего и модулирующего колебаний.

Демодуляция ФМ-сигнала. С целью демодуляции принятый модулированный сигнал перемножим с сигналом опорного генератора (гетеродина), совпадающего по частоте и фазе с опорным генератором передатчика и получим

$$v_{PM}(t) = V_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) - \\ - \Delta\varphi/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 - \Omega) \cdot t] + \\ + \Delta\varphi/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 + \Omega) \cdot t] \end{array} \right\} \cdot \cos(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) =$$

$$= V_0/2 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \langle \sin[(0) \cdot t + 0] + \sin[2 \cdot (\omega_0 \cdot t + \varphi_0)] \rangle - \\ - \Delta\varphi/2 \cdot \langle \sin[(-\Omega) \cdot t + 0] + \sin[(2 \cdot \omega_0 - \Omega) \cdot t + 2 \cdot \varphi_0] \rangle + \\ + \Delta\varphi/2 \cdot \langle \sin[(\Omega) \cdot t + 0] + \sin[(2 \cdot \omega_0 + \Omega) \cdot t + 2 \cdot \varphi_0] \rangle \end{array} \right\}.$$

С помощью ФНЧ убираем высокочастотные составляющие с частотами $(2 \cdot \omega_0 - \Omega)$ и $(2 \cdot \omega_0 + \Omega)$ и с точностью до множителя $V_0 \cdot \Delta\varphi/2$ восстанавливаем передаваемый информационный сигнал

$$v_{PM}(t) = V_0 \cdot \Delta\varphi/2 \sin[(\Omega) \cdot t].$$

Однотональная ЧМ. Учитывая, что при малой девиации $\Delta\omega \ll 1$,

$$\cos[\Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \approx 1,$$

$$\sin[\Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \approx \Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t),$$

и используя тригонометрические преобразования

$$\begin{aligned} v_{FM}(t) &= V_0 \cdot \sin[\varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)] = \\ &= V_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot \cos[\Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)] + \\ + \cos(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot \sin[\Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \end{array} \right\} \approx \\ &\approx V_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot 1 + \\ + \cos(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) \cdot \Delta\omega \cdot \sin(\Omega \cdot t) \end{array} \right\} \approx \\ &\approx V_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) - \\ - \Delta\omega/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 - \Omega) \cdot t] + \Delta\omega/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 + \Omega) \cdot t] \end{array} \right\}, \end{aligned}$$

получаем три составляющих однотонального ЧМ- колебания – на частоте несущего колебания ω_0 и на разностной $(\omega_0 - \Omega)$ и суммарной $(\omega_0 + \Omega)$ частотах несущего и модулирующего колебаний.

Отметим, что при малых девиациях фазы и частоты и однотональной модуляции спектры ФМ- и ЧМ- модулированных колебаний подобны спектру АМ- модулированного колебания, но *составляющая с разностной частотой $(\omega_0 - \Omega)$ имеет противоположный знак по отношению к составляющей суммарной частоты $(\omega_0 + \Omega)$.*

Демодуляция ЧМ-сигнала. С целью демодуляции принятый модулированный сигнал перемножим с сигналом опорного генератора (гетеродина), совпадающего по частоте и фазе с опорным генератором передатчика и получим

$$v_{FM}(t) = V_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \sin(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) - \\ - \Delta\omega/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 - \Omega) \cdot t] + \\ + \Delta\omega/2 \cdot \sin[\varphi_0 + (\omega_0 + \Omega) \cdot t] \end{array} \right\} \cdot \cos(\varphi_0 + \omega_0 \cdot t) =$$

$$= V_0/2 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \langle \sin[(0) \cdot t + 0] + \sin[2 \cdot (\omega_0 \cdot t + \varphi_0)] \rangle - \\ - \Delta\omega/2 \cdot \langle \sin[(-\Omega) \cdot t + 0] + \sin[(2 \cdot \omega_0 - \Omega) \cdot t + 2 \cdot \varphi_0] \rangle + \\ + \Delta\omega/2 \cdot \langle \sin[(\Omega) \cdot t + 0] + \sin[(2 \cdot \omega_0 + \Omega) \cdot t + 2 \cdot \varphi_0] \rangle \end{array} \right\}.$$

С помощью ФНЧ убираем высокочастотные составляющие с частотами $(2 \cdot \omega_0 - \Omega)$ и $(2 \cdot \omega_0 + \Omega)$ и с точностью до множителя $V_0 \cdot \Delta\omega/2$ восстанавливаем передаваемый информационный сигнал

$$v_{FM}(t) = V_0 \cdot \Delta\omega/2 \sin[(\Omega) \cdot t].$$

Геометрическое представление модулированных колебаний. При геометрическом представлении модулированных колебаний в виде вектора амплитудой V_0 вращающегося с частотой несущего (опорного) колебания ω_0 , из вершины которого выходят два вектора, соответствующие боковым составляющим и вращающиеся относительно опорного вектора с частотами $-\Omega$ и $+\Omega$, то есть навстречу друг другу. В результате абсолютная скорость вращения дополнительных векторов составляет $(\omega_0 - \Omega)$ и $(\omega_0 + \Omega)$. Для того чтобы найти результирующий вектор модулированного колебания необходимо сложить вектора боковых составляющих, а затем полученный вектор просуммировать с вектором опорного колебания.

Заметим, что сумма векторов представляет собой вектор, направленный из начала первого вектора в конец последнего при условии, что предварительно, сохраняя направления, начало последующего вектора совмещается с концом предыдущего вектора.

Из геометрического построения следует, что при АМ векторы боковых составляющих симметричны относительно вектора опорного колебания и их суммарный вектор будет либо складываться, либо вычитаться из вектора опорного колебания, тем самым изменяя амплитуду результирующего вектора и не изменяя частоты вращения ω_0 .

При угловой модуляции (ФМ и ЧМ) один из векторов боковых составляющих меняет направление на противоположное, в результате их суммарный вектор меняет амплитуду и направление таким образом, что результирующий вектор остается постоянным по амплитуде, но частота его вращения изменяется от $(\omega_0 - \Delta\omega_{max}) = (\omega_0 - \Omega)$ до $(\omega_0 + \Delta\omega_{max}) = (\omega_0 + \Omega)$. При этом угол отклонения результирующего вектора относительно опорного вектора изменяется от $-\Delta\varphi_{max}$ до $+\Delta\varphi_{max}$.

Ширина спектра частот модулированного колебания. Реальный модулирующий сигнал не является чистым тоном (гармоническим

колебанием), а представляет собой некую совокупность спектральных составляющих (гармоник) в полосе $\Delta\Omega$ сгруппированных около Ω . В результате вместо разностной и суммарной составляющих будем иметь области- нижних боковых частот ($\omega_0 - \Delta\Omega$) и – верхних боковых частот ($\omega_0 + \Delta\Omega$). Именно в боковых областях спектра переносится информация модулирующего сигнала, а на частоте несущего колебания информация не переносится и в этом смысле передача несущего колебания избыточна и энергетически затратная. Передача составляющей несущего колебания может быть оправдана лишь необходимостью восстановления частоты и/или фазы на приемной стороне с целью синхронизации опорных генераторов передатчика и приемника. Без синхронизации частоты и/или фазы опорного генератора на приемной стороне невозможен **прием – выделение информационного сигнала из принимаемого модулированного радиосигнала**.

Передача амплитудно-модулированного сигнала с полностью или частично подавленным колебанием несущей частоты соответствует **балансной амплитудной модуляции (БАМ) (DSB)**. Подавление колебания несущей частоты может осуществляться либо фильтрами, либо фазовым способом, при котором фаза несущего колебания периодически изменяется на 180° (или $2 \cdot \pi$ радиан), в результате спектральная компонента несущего колебания исчезает.

Кроме того, поскольку информационный сигнал продублирован в суммарной и разностной боковых составляющих спектра, то для передачи и соответственно приема (восстановления) информационного сигнала достаточно одной боковой полосы частот. Это обстоятельство используется в частотно-эффективных видах угловой модуляции, при которых передается одна из боковых полос и подавленное несущее колебание. Передача сигнала с подавлением одной из боковых полосы частот и несущего колебания соответствует **однополосной амплитудной модуляции (ОАМ) (SSB)**. Подавление несущего колебания и одной из боковых полос частот может осуществляться как фильтрами, так и фазовым способом.

Ширина частотных полос $\Delta\Omega$ определяется шириной спектра передаваемого информационного сигнала $\Delta F = 2 \cdot F_{max}$ и пропорциональна девиациям частоты $\Delta\omega$ и/или фазы $\Delta\varphi$.

$$\Delta\Omega_{FM} = \Delta\omega \cdot 2 \cdot F_{max} = \Delta\omega \cdot \Delta F,$$

$$\Delta\Omega_{PM} = \Delta\varphi \cdot \Omega \cdot 2 \cdot F_{max} = m_\omega \cdot \Delta F,$$

где F_{max} - верхняя граничная частота в спектре информационного сигнала.

В связи с этим различают узкополосную угловую модуляцию $\Delta\varphi \leq 1$ и $\Delta\omega \leq 1$ и широкополосную - $\Delta\varphi \gg 1$ и $\Delta\omega \gg 1$.

При узкополосной угловой модуляции весь спектр сосредоточен в пределах от $\omega_0 - 2 \cdot F_{max}$ до $\omega_0 + 2 \cdot F_{max}$, т.е. ширина спектра составляет примерно $\Delta\Omega_{\Sigma} \approx 4 \cdot F_{max}$.

При широкополосной угловой модуляции полоса занимаемых частот определяется девиацией частоты $\Delta\Omega_{\Sigma} \approx 2 \cdot \Delta\Omega_{FM}$ или $\Delta\Omega_{\Sigma} \approx 2 \cdot \Delta\Omega_{PM}$.

DSB-модуляция. Как уже отмечалось, использование классической амплитудной модуляции энергетически неэффективно из-за необходимости передачи составляющей с частотой несущего колебания, которая не содержит информационного сообщения. Кроме того, помехи и шумы радиоканала (передатчик, приемник и канал распространения радиоволн) имеют, как правило, широкий спектр и накладываются на полезный сигнал, размывая его. В результате воздействия шумов и помех радиоканала радиосигнал начинает тонуть в шумах, что приводит к заметным искажениям, ошибкам и сбоям оборудования, то есть канал радиосвязи при большом уровне шумов и помех становится ненадежным. Основным параметром оценивающим уровень помех в радиоканале является соотношение сигнал/шум $\gamma = P_S/P_N$. Попытка поднять уровень сигнала за счет большего усиления малоэффективна так как при этом усиливаются и шумы, а кроме того перегружаются выходные каскады передатчиков, из-за необходимости передачи не только боковых составляющих, но и составляющей с частотой несущего колебания, уровень которой выше боковых составляющих. Перегрузка выходных каскадов из-за необходимости передачи мощности на частоте несущего колебания приводит к дополнительным искажениям, что еще больше снижает соотношение сигнал/шум.

Однотональная DSB-модуляция. Аналитически однотональную балансную амплитудную модуляцию несущего колебания можно представить соотношением

$$v_{DSB}(t) = V_0 \cdot \cos(\Omega \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) = \\ = V_0/2 \cdot \langle \cos[\varphi_0 + (\omega_0 - \Omega) \cdot t] + \cos[\varphi_0 + (\omega_0 + \Omega) \cdot t] \rangle.$$

Как видим в спектре балансно- амплитудно-модулированного однотональным сигналом колебания присутствуют суммарная и разностная составляющие и отсутствует составляющая на частоте несущего колебания.

Демодуляция DSB-сигнала. Демодуляции принятого модулированного радиосигнала осуществляется перемножением его с сигналом опорного генератора (гетеродина) приемника, совпадающего по частоте и фазе с опорным генератором передатчика, и получим

$$v_{DSB}(t) = V_0 \cdot m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) =$$

$$\begin{aligned}
 &= V_0/2 \cdot m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t) \cdot \langle \cos[(0) \cdot t + 0] + \cos[2 \cdot (\omega_0 \cdot t + \varphi_0)] \rangle = \\
 &= V_0/2 \cdot m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t) \cdot \langle 1 + \cos[2 \cdot (\omega_0 \cdot t + \varphi_0)] \rangle.
 \end{aligned}$$

Далее сигнал подается на ФНЧ с целью фильтрации высокочастотных компонент $2 \cdot \omega_0$ преобразователя. После ФНЧ составляющая с частотой $2 \cdot \omega_0$ исчезает

$$v_{DSB}(t) = V_0/2 \cdot m_a \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

и остается модулирующий сигнал с точностью до множителя

$$V_0 \cdot m_a/2.$$

Однотональная SSB-модуляция. Однополосная амплитудная модуляция может быть реализована фильтровым либо фазовым методом. Подавление верхней либо нижней боковых полос DSB- сигнала не представляет аналитического интереса, поэтому остановимся подробнее на фазовом методе формирования SSB- сигнала. Прежде всего, фазовый метод однополосной модуляции предполагает расщепление входного модулирующего сигнала на квадратурные составляющие. В синфазном канале модулятора оказывается исходный модулирующий сигнал, а в квадратурном канале Гильберт-преобразование модулирующего сигнала. Далее сигналы квадратурных каналов поступают на перемножители, на вторые входы которых в синфазном канале подается косинус частоты несущего колебания $V_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$, а в квадратурном канале - синус частоты несущего колебания $V_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)$. При одномодальном модулирующем сигнале вида $U(t) = \sin(\Omega \cdot t)$, его Гильберт-преобразование представляется в виде $U_G(t) = \cos(\Omega \cdot t)$. Сигналы на выходах перемножителей квадратурных каналов могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned}
 V_I(t) &= V_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot \sin(\Omega \cdot t) = \\
 &= V_0/2 \cdot \langle \sin [(\omega_0 + \Omega) \cdot t] - \sin [(\omega_0 - \Omega) \cdot t] \rangle; \\
 V_Q(t) &= V_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) \cdot \cos(\Omega \cdot t) = \\
 &= V_0/2 \cdot \langle \sin [(\omega_0 - \Omega) \cdot t] + \sin [(\omega_0 + \Omega) \cdot t] \rangle.
 \end{aligned}$$

Вычитая из квадратурной составляющей синфазную составляющую модулятора, получим однополосный модулированный сигнал на нижней боковой частоте

$$v_{SSB}(t) = V_Q(t) - V_I(t) = V_0 \cdot \sin[(\omega_0 - \Omega) \cdot t]$$

с точностью до множителя V_0 .

При сложении синфазной и квадратурной составляющих модулятора получаем однополосный модулированный сигнал на верхней боковой частоте

$$v_{SSB}(t) = V_I(t) + V_Q(t) = V_0 \cdot \sin[(\omega_0 + \Omega) \cdot t]$$

с точностью до множителя V_0 .

Демодуляция SSB-сигнала. Демодуляции принятого модулированного радиосигнала осуществляется перемножением его с сигналом опорного генератора (гетеродина) приемника, совпадающего по частоте и фазе с опорным генератором передатчика, и получим

$$\begin{aligned} v_{SSB}(t) &= V_0 \cdot \sin[(\omega_0 - \Omega) \cdot t] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0) = \\ &= V_0/2 \cdot \langle \sin(-\Omega \cdot t + \varphi_0) + \sin[(2 \cdot \omega_0 - \Omega) \cdot t + \varphi_0] \rangle. \end{aligned}$$

Далее сигнал подается на ФНЧ с целью фильтрации высокочастотных компонент $(2 \cdot \omega_0 - \Omega)$ преобразователя. После ФНЧ составляющая с частотой $(2 \cdot \omega_0 - \Omega)$ исчезает

$$v_{DSB}(t) = -V_0/2 \cdot m_a \cdot \sin(\Omega \cdot t)$$

и остается модулирующий сигнал с точностью до множителя и знака $V_0/2$.

Таким образом, нами подробно рассмотрено математическое описание процессов однотональной модуляции и демодуляции типа АМ, ФМ и ЧМ. Класс угловой модуляции ФМ и ЧМ рассмотрен для узкополосного случая $\Delta\varphi \leq 1$ и $\Delta\omega \leq 1$. Широкополосный случай $\Delta\varphi \gg 1$ и $\Delta\omega \gg 1$ при больших девиациях фазы и частоты гораздо сложнее и требует привлечения функций Бесселя.

3. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛОГОВОЙ МОДУЛЯЦИИ (ФРАГМЕНТ Н/Т ОТЧЕТА)

*Фрагмент научно-технического отчета по исследованию методов аналоговой модуляции в среде функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab** позволяет на конкретных примерах рассмотреть методику организации исследований, варианты функциональных моделей модемов и форму представления результатов.*

Аналоговая модуляция в ряде приложений по-прежнему сохраняет свои позиции в силу простоты реализации приемо-передающих модулей,

поэтому современные анализаторы сигналов должны быть способны генерировать, принимать и измерять параметры сигналов с аналоговой модуляцией.

Генерация, прием и обработка сигналов в современных векторных анализаторах реализуются на функциональном уровне программно-аппаратно с использованием базовых операций преобразования сигналов. Современные среды функционального моделирования технических систем типа **Simulink** системы **MatLab** позволяют на блочно-функциональном уровне описать модели модуляторов и демодуляторов аналоговых сигналов. Тем самым **Simulink-модели** по существу являются своего рода формой представления соответствующих алгоритмов модуляции, демодуляции и измерения параметров сигналов с аналоговой модуляцией. **Simulink-модели** позволяют протестировать структуры модемов, понять основные этапы преобразования сигналов, оценить влияние основных параметров приемопередающего тракта и отработать алгоритмы измерения параметров сигналов с аналоговой модуляцией.

Среда моделирования. Моделирование в **Simulink** производится в относительном временном масштабе по математической модели соответствующей функциональной схемы. Функциональные схемы или модели систем и устройств формируются из нескольких типов функциональных блоков:

1. **Источники сигналов** (различного рода генераторы гармонических колебаний, последовательностей импульсов, псевдослучайных процессов, констант, входных портов и т. д.).
2. **Индикаторы сигналов** (осциллографы, дисплеи, нагрузки, выходные, порты, спектро-анализаторы и т. д.).
3. **Математические преобразования** (основные математические операции).
4. **Логические преобразования** (основные логические операции).
5. **Векторно-матричные преобразования** и трансформация сигналов (спектральные преобразования).
6. **Коммутация, разветвления** (мультиплексирование, демультимплексирование).
7. **Преобразования определяемые пользователем** (**MatLab**-функции, **S**-функции).

Каждому функциональному блоку ставится в соответствие математическая модель в виде алгебраического, дифференциального или разностного уравнения либо системы соответствующих уравнений, решаемых численными методами во временной области. При использовании спектро-анализаторов производится накопление отсчетов сигнала в буфере, файле либо рабочей области и их прямое либо обратное спектральное преобразование и отображение на мониторе. Объединение (композиция)

блоков автоматически определяет полную математическую модель функциональной схемы устройства и алгоритм ее решения, который зависит также и от исходных установок пакета **Simulink**.

Способы реализации функциональных моделей модемов с основными видами аналоговой модуляции могут быть разными. В данном проекте предлагается использовать идею **прямого преобразования спектра**, что позволяет существенно упростить функциональные модели модемов и алгоритмов обработки сигналов без потери их качества и с сохранением возможностей исследования влияния основных параметров приемо-передающих трактов на передачу информационных сигналов. К таким параметрам можно отнести: индексы модуляции, отношение частоты несущего колебания к верхней частоте спектра информационного сигнала, полосы пропускания радиочастотного фильтра и фильтра нижних частот, уход частоты и фазы опорного генератора приемного тракта и так далее.

Структура модели модема аналоговой модуляции на основе прямого преобразования спектра включает в себя блоки или модели: формирователя (генератора) тестового сигнала, опорного генератора несущего колебания передатчика, модулятора, выходного формирующего фильтра передатчика, канала распространения, входного селективирующего фильтра приемника, опорного генератора несущего колебания приемника, демодулятора, результирующего низкочастотного фильтра приемника и оконечного устройства фиксации (отображения) принятого тестового сигнала. В каждом конкретном случае некоторые блоки могут отсутствовать либо модифицироваться. Наряду с простыми одноканальными схемами могут использоваться балансные схемы модуляторов и демодуляторов.

Требования к модему. Основными требованиями предъявляемым к модемам с аналоговой модуляцией являются простота программно-аппаратной реализации и точность воспроизведения формы передаваемых сигналов, что обеспечивается правильным выбором полос пропускания и обработки, линейностью приемо-передающих трактов и соотношением сигнал/шум на входе приемного тракта. Простота в данном случае обеспечивается использованием **принципа прямого преобразования спектра принимаемого сигнала**, в область низких частот, минуя переход на конечную промежуточную частоту. При необходимости возможно и кратное преобразование спектра принимаемого сигнала, однако принципиально нового в плане приема, обработки и измерения параметров модулированных сигналов это не добавляет.

Виды аналоговой модуляции. Основными видами аналоговой модуляции являются: амплитудная модуляция (**АМ**) - amplitude modulation

(АМ); балансная амплитудная модуляция (БАМ) - double side band (DSB); амплитудная модуляция с одной боковой полосой - однополосная АМ (ОМ) - single-sideband modulation (SSB); частотная модуляция (ЧМ) – frequency modulation (FM); фазовая модуляция (ФМ) – phase modulation (PM).

Параметры аналоговой модуляции. Векторные анализаторы спектра предполагается использовать как для измерения параметров сигналов, так и отладки и настройки соответствующего оборудования. В связи с этим векторный анализатор сигналов применительно к аналоговой модуляции должен измерять следующие параметры:

1. Тип модуляции.
2. Девиацию амплитуды, фазы или частоты.
3. Индекс модуляции.
4. Частоту несущего колебания.
5. Диапазон частот, занимаемый модулированным сигналом.
6. Мощность модулированного сигнала.
7. Уровень внеполосных составляющих спектра.
8. Точность воспроизведения формы передаваемого сигнала в приемнике.

Алгоритмы измерения параметров модулированных сигналов. Программно-аппаратная реализация векторных анализаторов сигналов делает возможными вычисление на любом этапе преобразования сигнала таких вспомогательных характеристик как:

1. Спектр сигнала.
2. Спектральную плотность сигнала.
3. Взаимно-корреляционную функцию.
4. Вычисление текущего значения определенного интеграла по временной реализации.

По спектру сигнала и спектральной плотности может быть измерена частота несущего колебания, сделаны оценки индекса модуляции, девиации модуляционного параметра, ширины спектра сигнала. По спектральной плотности может быть оценена мощность модулированного сигнала и уровня внеполосного излучения. Схема измерения спектра и спектральной плотности приведена на рисунке 3.1

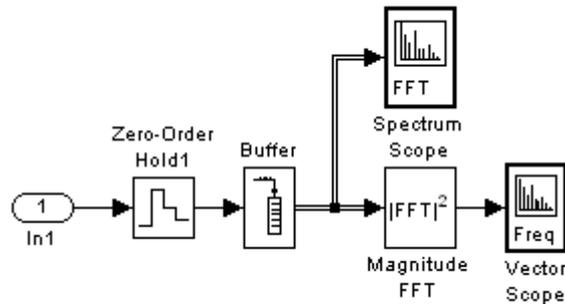


Рисунок 3.1 - Функциональная схема измерения спектра и спектральной плотности модулированного сигнала

Для оценки мощности передаваемого модулированного сигнала во времени можно воспользоваться интегрированием квадрата сигнала, в пределах периода времени определяемого верхней частотой спектра модулирующего сигнала. Схема измерения текущей мощности модулированного сигнала на основе интегратора со сбросом приведена на рисунке 3.2

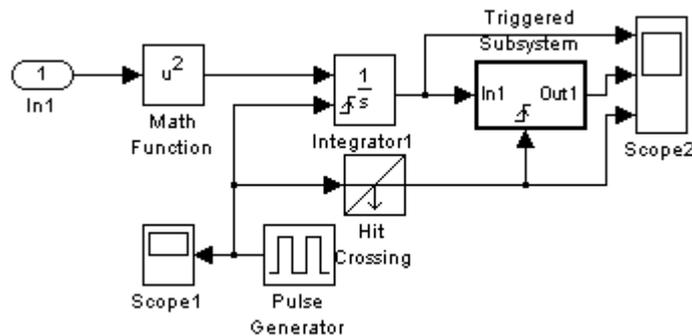


Рисунок 3.2 – Функциональная схема измерения текущей мощности модулированного сигнала

Тип модуляции (амплитудная или угловая) можно определить по осциллограмме модулированного сигнала. Тип амплитудной модуляции (обычная, балансная с подавленной несущей или однополосная) можно определить по спектру. Тип угловой модуляции (фазовая или частотная) можно определить по зависимости индекса модуляции от однотональной частоты модуляции при стендовых испытаниях аппаратуры, когда имеется возможность ее изменения.

Точность воспроизведения формы передаваемого сигнала в приемнике можно оценить по качеству принятого сигнала (передача звука или изображения). При стендовых испытаниях и настройке аппаратуры, когда

доступен информационный сигнал, количественную оценку можно произвести по значению функции взаимной корреляции исходного и принятого информационных сигналов. Функциональная схема измерения точности воспроизведения формы передаваемого сигнала по взаимной корреляционной функции, переданного и принятого сигналов, приведена на рисунке 3.3

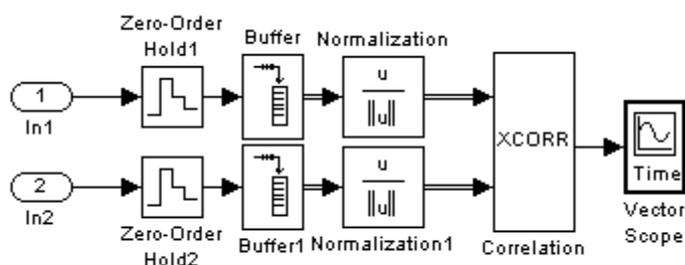


Рисунок 3.3 – Функциональная схема измерения точности воспроизведения формы передаваемого сигнала по взаимной корреляционной функции, переданного и принятого сигналов

Функциональные схемы модемов аналоговой модуляции. Типовая схема модема на основе прямого преобразования состоит из трех частей передающей, приемной и модели канала распространения модулированного радиосигнала.

Передающая часть модема включает генератор (источник) информационного сигнала, высокочастотный генератор опорного колебания передатчика, модулятор (перемножитель) на входы которого подаются модулирующий информационный сигнал и опорное колебание радиочастоты. При квадратурной реализации модулятор состоит из двух перемножителей и сумматора на выходе. В этом случае модулирующий сигнал и опорное колебание подаются на входы умножителей с фазовой задержкой $\pi/2$. Источник информационного сигнала представлен в моделях либо в виде низкочастотного моногармонического колебания, либо совокупностью нескольких (в нашем случае трех) моногармонических колебаний разных частот, амплитуды и фазы которых можно изменять. На выходе передающей части может быть установлен формирующий полосовой фильтр с целью снижения внеполосных излучений.

Простейшая модель канала распространения представляет собой сумматор модулированного колебания несущей и помехи реализуемой генератором случайных процессов.

Приемная часть модема включает высокочастотный генератор опорного колебания приемника, демодулятор в виде перемножителя принятого радиосигнала и опорного колебания радиочастоты,

селектирующий фильтр нижних частот, окончное устройство отображения принятого информационного сигнала. При квадратурной реализации демодулятора принятый радиосигнал разветвляется и подается на оба множителя, на вторые входы которых подается опорное колебание с фазовой задержкой $\pi/2$. При частотной модуляции перед окончным устройством отображения информационного сигнала ставится преобразователь фазы в частоту в виде дифференциатора.

Предварительные пояснения к функциональным моделям. Во всех промежуточных точках функциональных моделей модемов подключены осциллографы для обеспечения возможности наблюдения основных этапов преобразования сигнала при модуляции и демодуляции. Кроме того, для дополнения картины временных преобразований сигнала спектральными преобразованиями - на выходе источника информационного сигнала, на выходе передающей или входе приемной части и на выходе приемной части подключены простейшие блоки отображения спектральной плотности мощности. Блоки и схемы обеспечивающие измерение основных параметров модулированных сигналов на основе спектро- анализаторов, интеграторов и функции взаимной корреляции приведенные ранее (см. рис. 3.1 – 3.3) исключены из функциональных схем модемов с целью облегчения восприятия.

В функциональных моделях аналоговой модуляции использованы два вида источника модулирующего сигнала - моногармонический источник с частотой $\Omega = \pi/4$ [рад/сек], используемый при исследовании классических зависимостей параметров модуляции и полигармонический источник с частотами $\Omega_1 = \pi/4$ [рад/сек], $\Omega_2 = \pi/2$ [рад/сек], $\Omega_3 = \pi$ [рад/сек], используемый для исследования параметров модуляции при сложных сигналах. Соответственно, граничная частота низкочастотного селектирующего фильтра в первом случае выбирается равной $\Omega_{gr} \geq \pi/4$ [рад/сек], а во втором случае - $\Omega_{gr} \geq \pi$ [рад/сек]. Для определенности значение частоты опорного генератора несущего колебания выбрано равной $\omega = 5 \cdot \pi$ [рад/сек].

С целью сокращения объема отчета принято сократить число рассматриваемых моделей разумным минимумом не отвлекаясь на многочисленные варианты реализации. ***Что касается приведенных моделей, то решено было ограничиться лишь функциональной схемой, осциллограммой и графиками спектральной плотности мощности модулированного радиосигнала на выходе модулятора.***

Функциональные модели аналоговой модуляции

На рисунках 3.4 – 3.5 приведены функциональные схемы модемов с полной аналоговой модуляцией. В первой схеме использован моногармонический источник модулирующего сигнала. Во второй схеме применен полигармонический источник модулирующего сигнала. Установка параметра блока *Constant1* передатчика равным **0** превращает *модулятор с полной амплитудной модуляцией* в *балансную амплитудную модуляцию*. В приемниках модема отображен блок *Saturation* (в нашем случае односторонний ограничитель), подключение которого вместо демодулятора превращает приемник модема в детекторный.

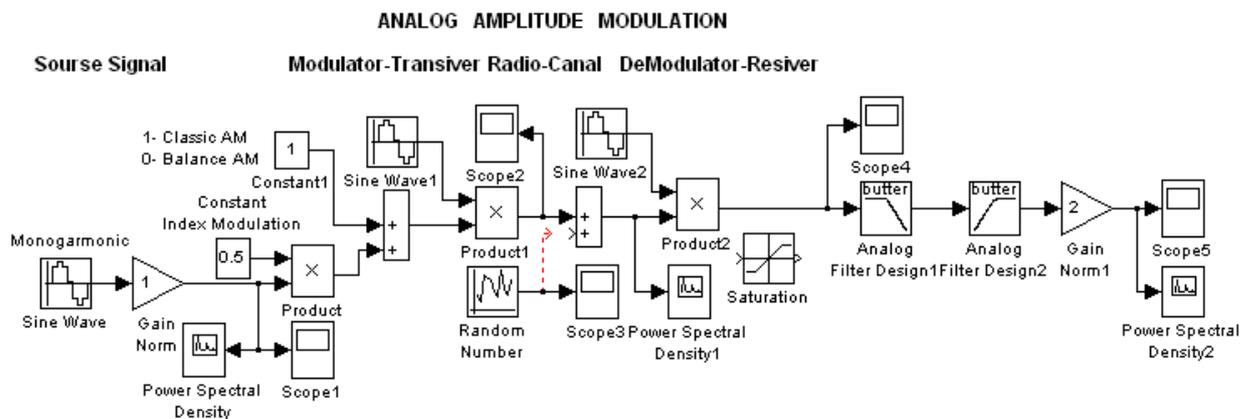


Рисунок 3.4 – Функциональная схема модема с полной аналоговой модуляцией (источник моногармонический)

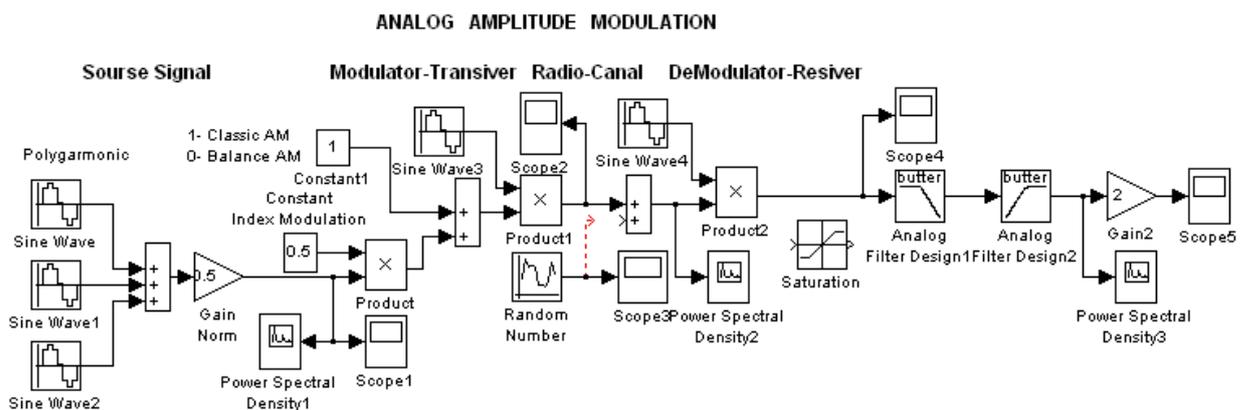


Рисунок 3.5 – Функциональная схема модема с полной аналоговой модуляцией (источник полигармонический)

На рисунках 3.6 – 3.9 приведены временное и спектральное представление радиосигналов с полной аналоговой модуляцией при моно- и поли- гармонических источниках модулирующего сигнала

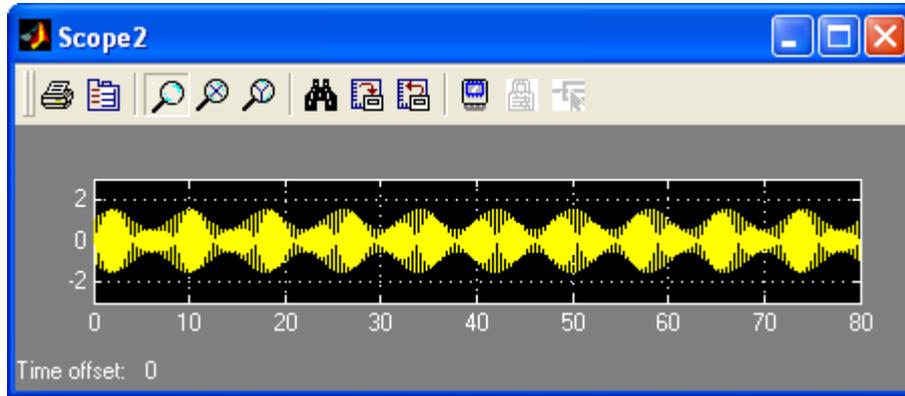


Рисунок 3.6 – Временное представление радиосигнала с полной аналоговой модуляцией при моногармоническом источнике модулирующего сигнала

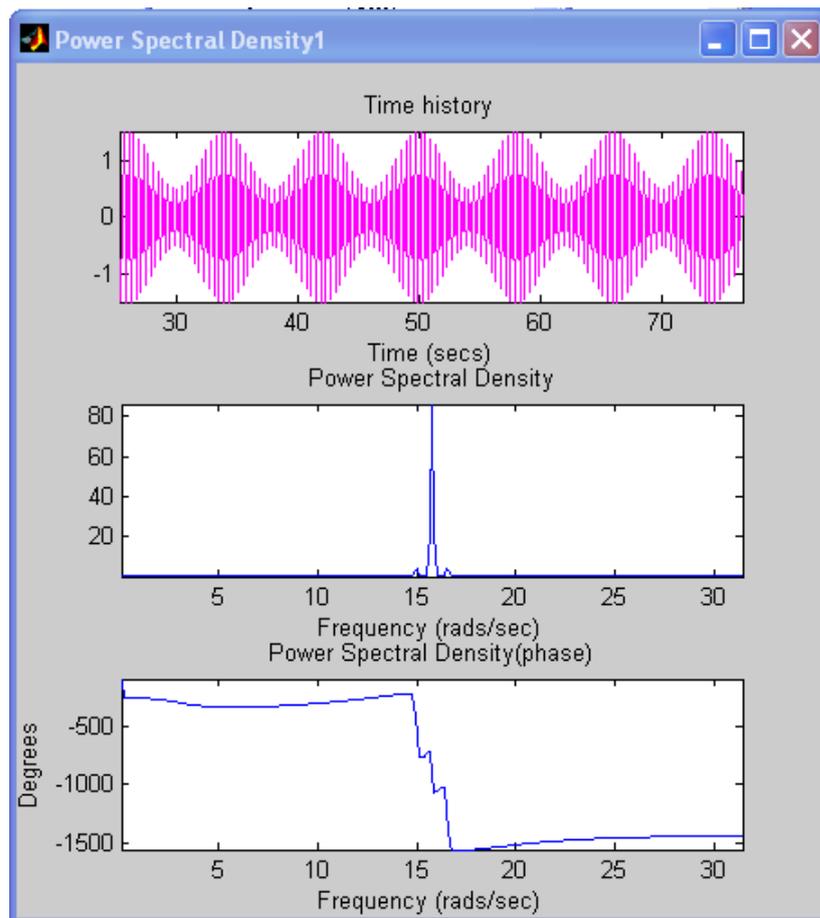


Рисунок 3.7 - Спектральное представление радиосигнала с полной аналоговой модуляцией при моногармоническом источнике модулирующего сигнала

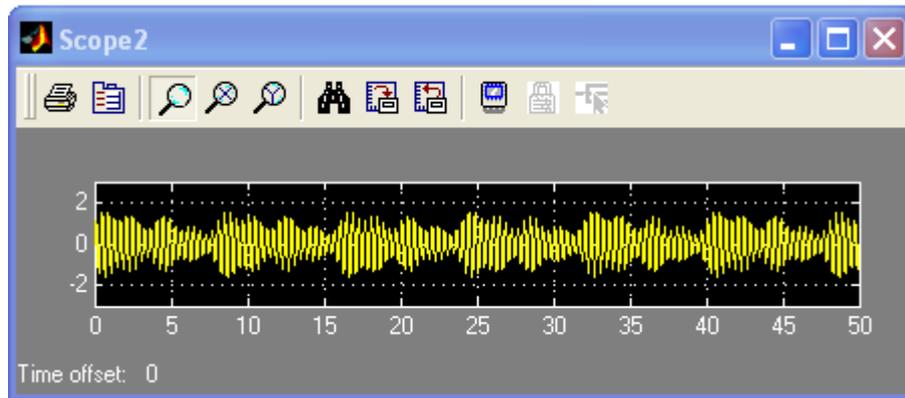


Рисунок 3.8 – Временное представление радиосигнала с полной аналоговой модуляцией при полигармоническом источнике модулирующего сигнала

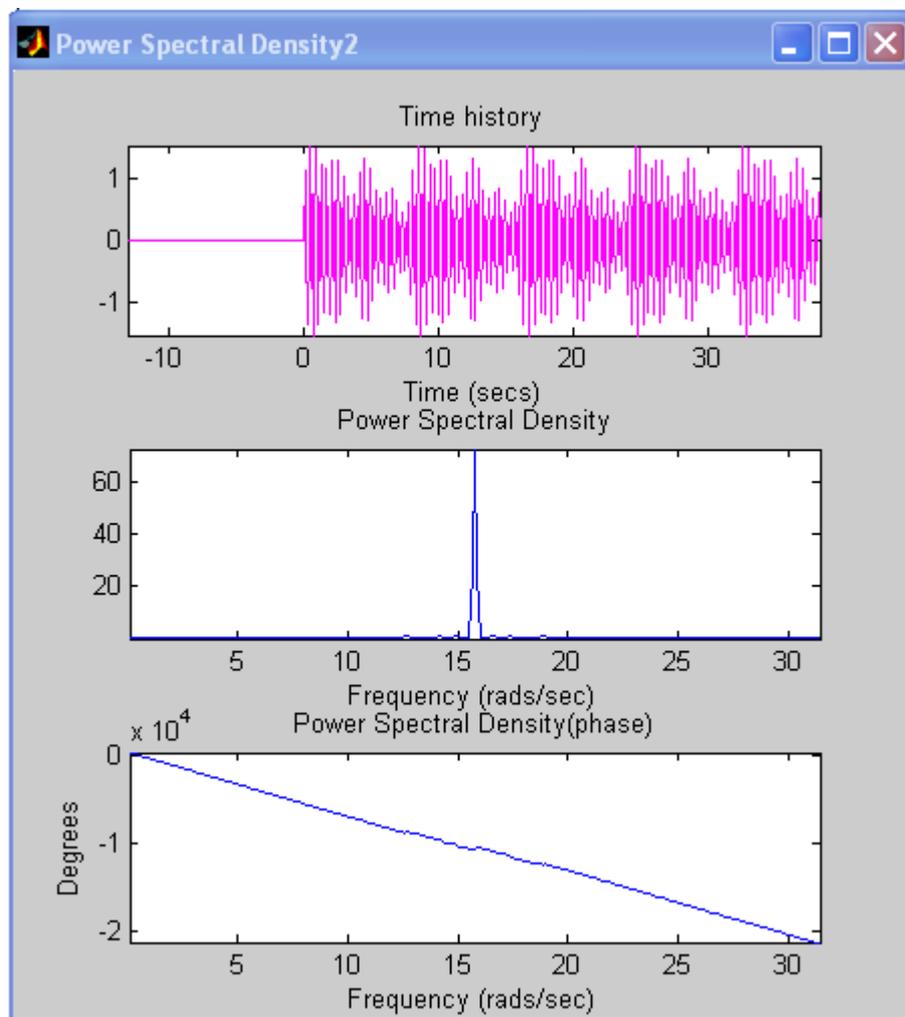


Рисунок 3.9 - Спектральное представление радиосигнала с полной аналоговой модуляцией при полигармоническом источнике модулирующего сигнала

Осциллограммы радиосигналов с полной аналоговой амплитудной модуляцией представляют собой изменяемую в такт с модулирующим сигналом амплитуду несущего колебания. Спектрограммы свидетельствуют о малых значениях амплитуд боковых составляющих спектральной плотности мощности по сравнению с составляющей несущего колебания.

На рисунках 3.10 – 3.11 приведены функциональные схемы модемов с балансной аналоговой модуляцией в одноканальной и квадратурной реализациях

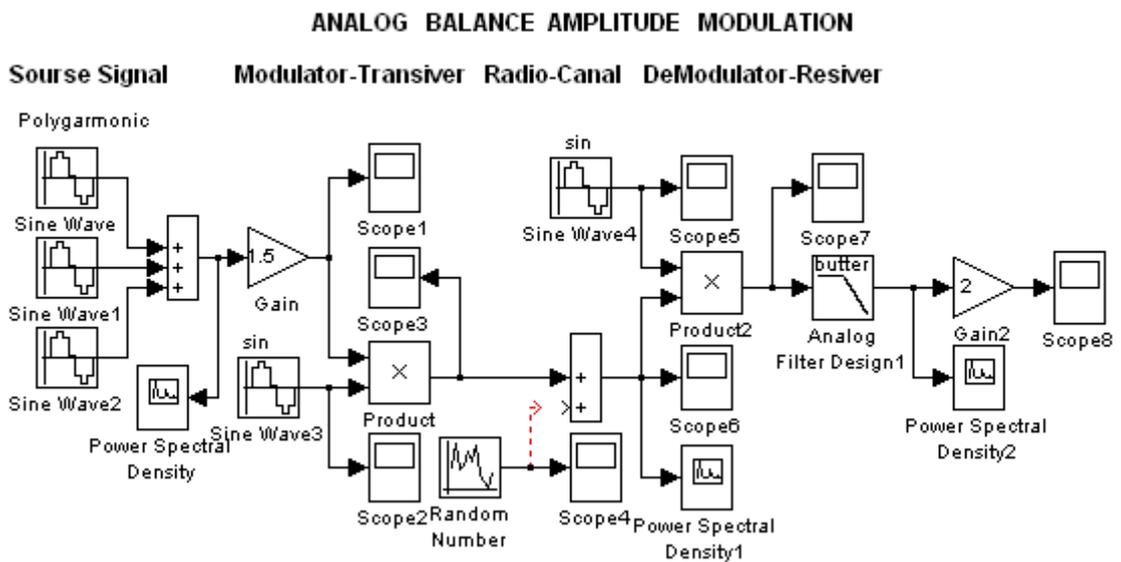


Рисунок 3.10 – Функциональная схема модема с балансной аналоговой модуляцией (одноканальная реализация, источник полигармонический)

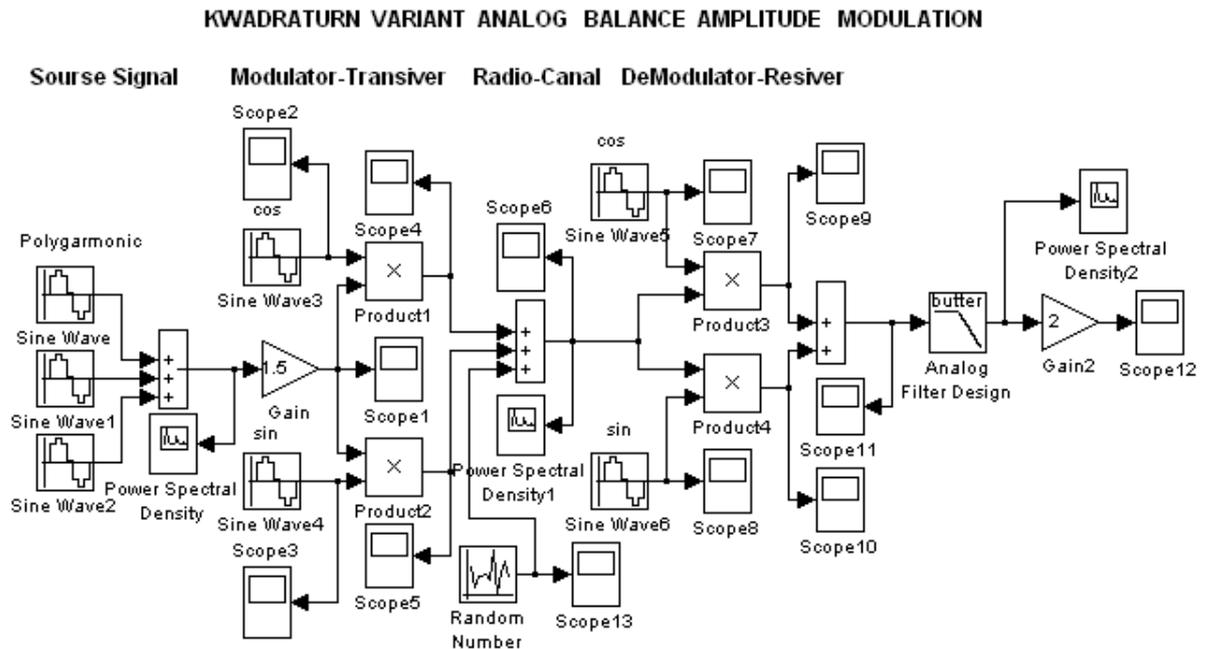


Рисунок 3.11 – Функциональная схема модема с балансной аналоговой модуляцией (квадратурная реализация, источник полигармонический)

На рисунках 3.12 – 3.15 приведены временное и спектральное представление радиосигналов с балансной аналоговой модуляцией при полигармоническом источнике модулирующего сигнала в одноканальной и квадратурной реализациях

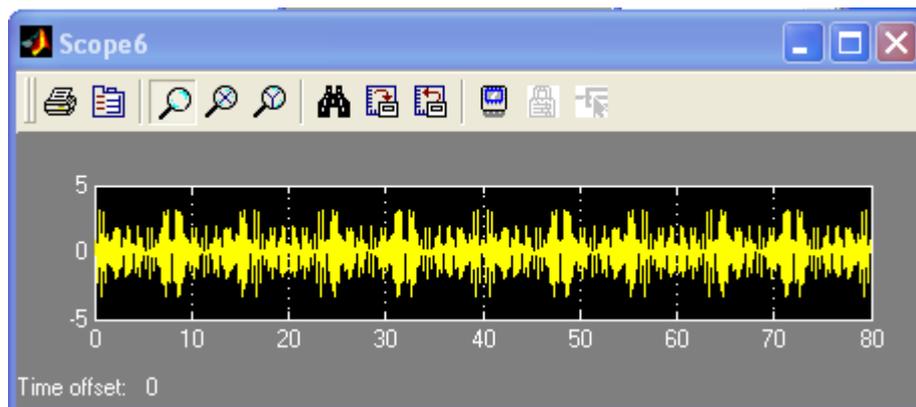


Рисунок 3.12 – Временное представление радиосигнала с балансной аналоговой модуляцией при полигармоническом источнике модулирующего сигнала (одноканальная реализация)

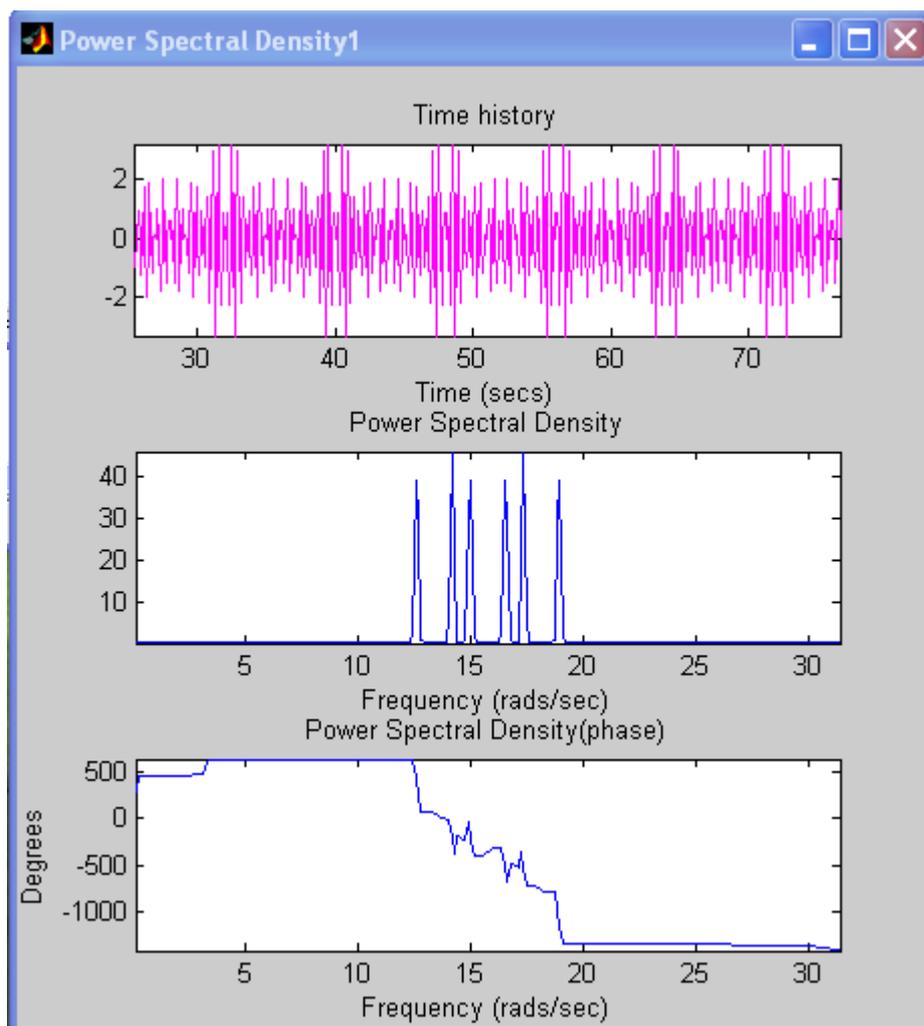


Рисунок 3.13 - Спектральное представление радиосигнала с балансной аналоговой модуляцией при полигармоническом источнике модулирующего сигнала (одноканальная реализация)

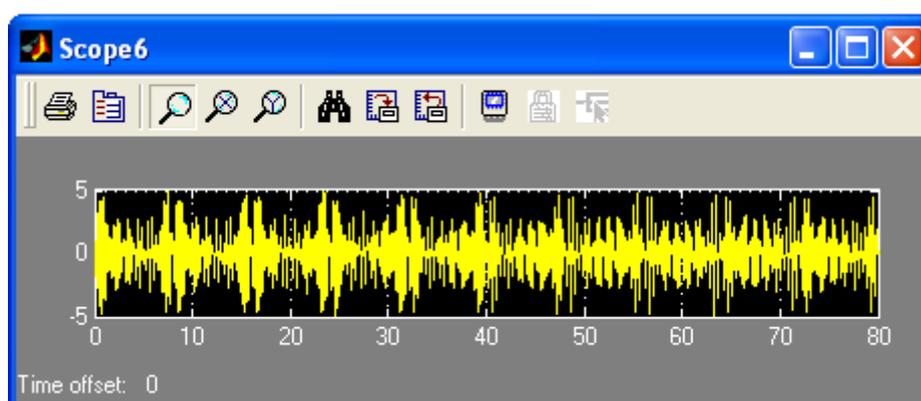


Рисунок 3.14 – Временное представление радиосигнала с балансной аналоговой модуляцией при полигармоническом источнике модулирующего сигнала (квадратурная реализация)

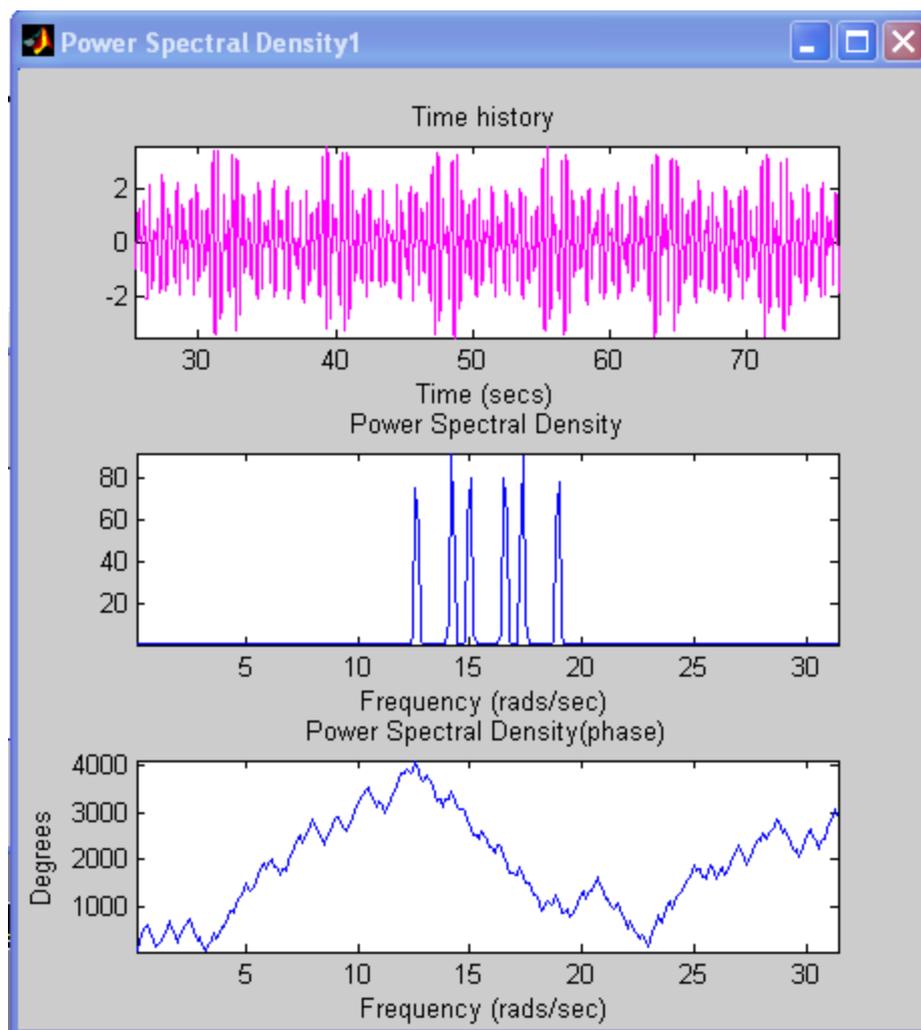


Рисунок 3.15 - Спектральное представление радиосигнала с балансной аналоговой модуляцией при полигармоническом источнике модулирующего сигнала (квадратурная реализация)

Осциллограммы радиосигналов с балансной аналоговой амплитудной модуляцией свидетельствуют о периодической смене полярности несущего колебания. Спектрограммы свидетельствуют об отсутствии в спектральной плотности мощности составляющей несущего колебания.

При построении функциональных схем квадратурной (однополосной) модуляции применен фазовый метод, поскольку фильтровой метод получения квадратурной модуляции из балансной достаточно тривиален.

На рисунке 3.16 – приведена упрощенная функциональная схема модема квадратурной (однополосной) аналоговой амплитудной модуляции при использовании дифференцирующей и интегрирующей цепей в квадратурных каналах модулятора

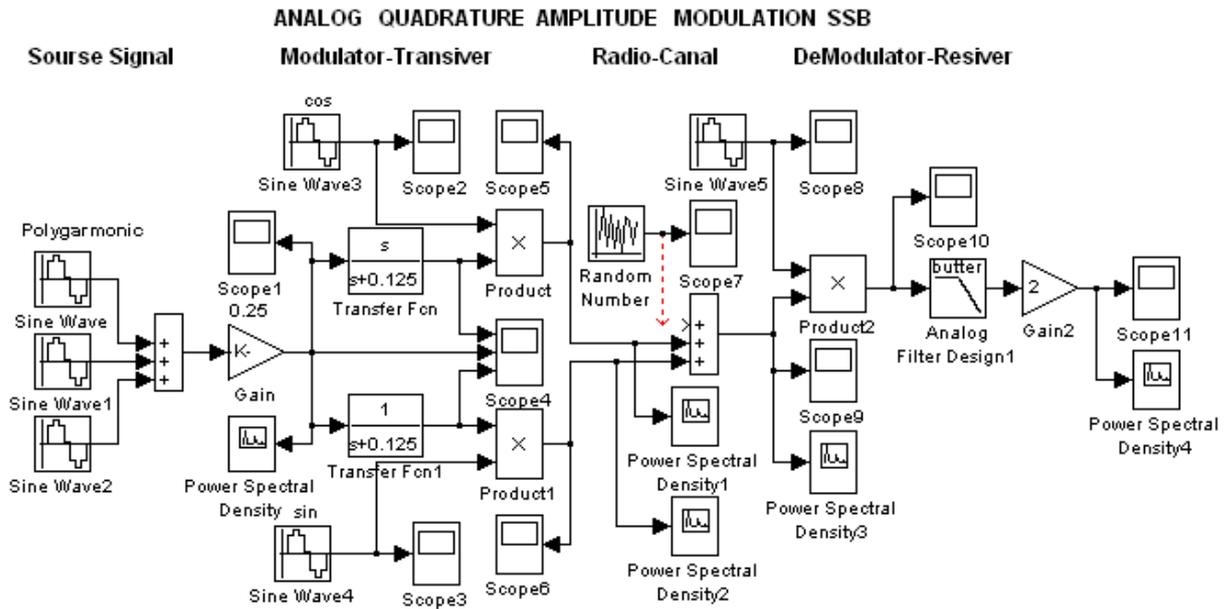


Рисунок 3.16 – Упрощенная функциональная схема модема квадратурной (однополосной) аналоговой амплитудной модуляции при использовании дифференцирующей и интегрирующей цепей в квадратурных каналах модулятора

На рисунках 3.17 – 3.18 приведены временное и спектральное представление радиосигналов квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции при использовании дифференцирующей и интегрирующей цепей в квадратурных каналах модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

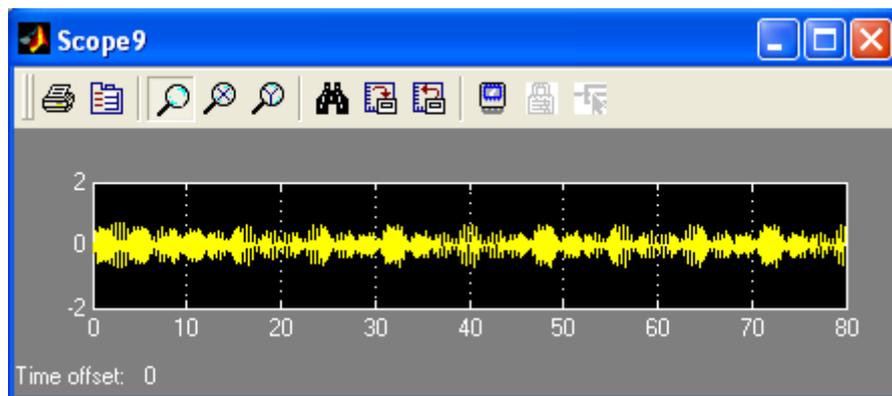


Рисунок 3.17 – Временное представление радиосигнала квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции при использовании дифференцирующей и интегрирующей цепей в квадратурных каналах модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

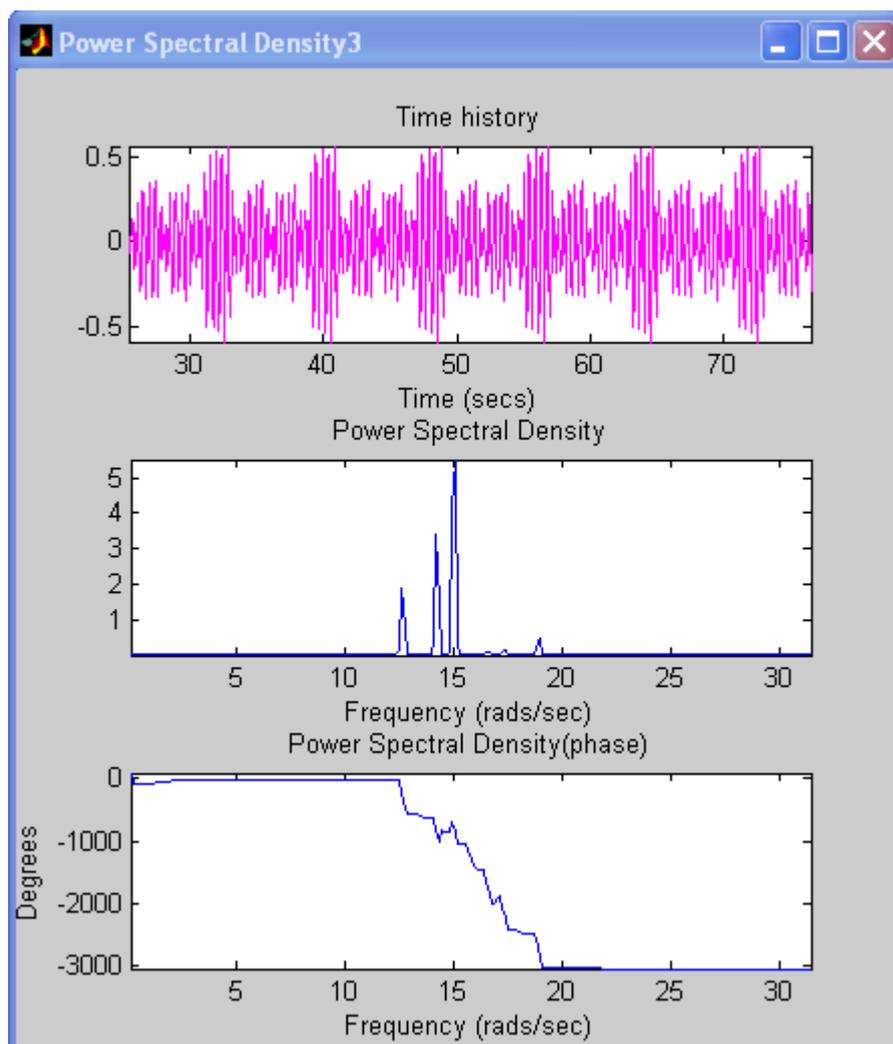


Рисунок 3.18 – Спектральное представление радиосигнала квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции при использовании дифференцирующей и интегрирующей цепей в квадратурных каналах модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

Как видим, в данном случае, низкочастотные боковые составляющие оказались подавленными, что приведет к искажению формы принимаемого информационного сигнала.

На рисунке 3.19 – приведена упрощенная функциональная схема модема квадратурной (однополосной) аналоговой амплитудной модуляции при использовании операции дифференцирования в квадратурном канале модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

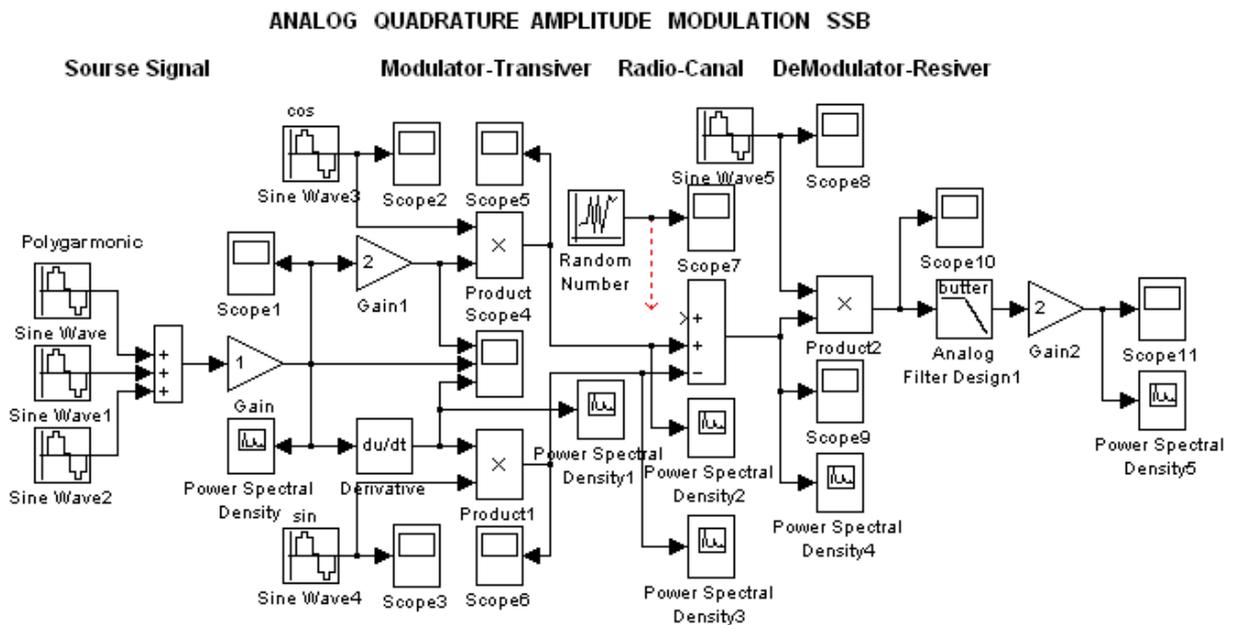


Рисунок 3.19 – Упрощенная функциональная схема модема квадратурной (однополосной) аналоговой амплитудной модуляции при использовании операции дифференцирования в квадратурном канале модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунках 3.20 – 3.21 приведены временное и спектральное представление радиосигналов квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции при использовании операции дифференцирования в квадратурном канале модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

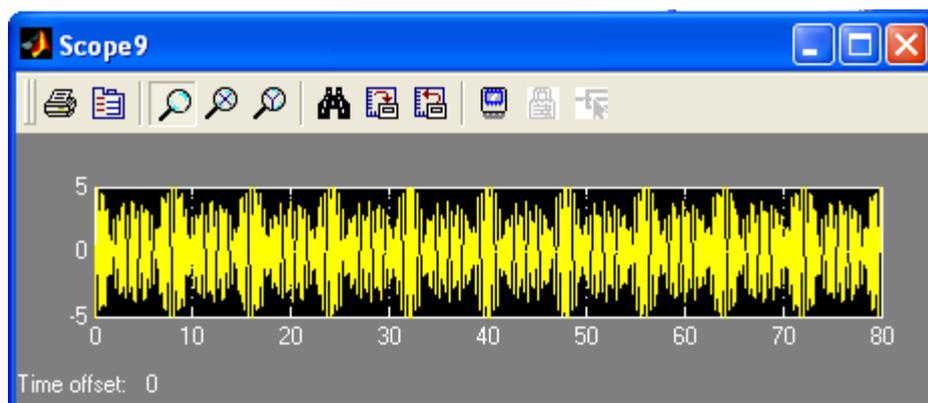


Рисунок 3.20 – Временное представление радиосигнала квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции при использовании операции дифференцирования в квадратурном канале модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

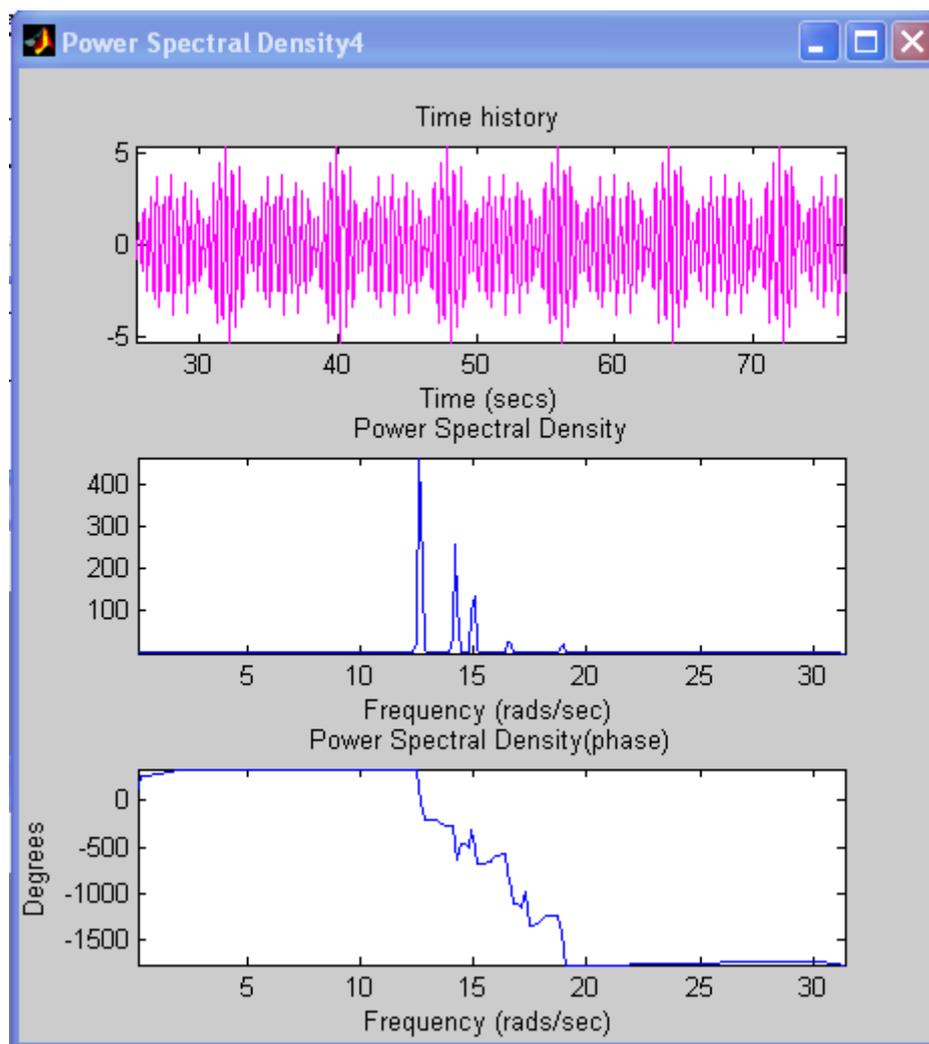


Рисунок 3.21 – Спектральное представление радиосигнала квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции при использовании операции дифференцирования в квадратурном канале модулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

Как видим, в данном случае, высокочастотные боковые составляющие оказались подавленными, что приведет к искажению формы принимаемого информационного сигнала.

На рисунке 3.22 – приведена функциональная схема модема квадратурной (однополосной) аналоговой амплитудной модуляции с верхней и нижней настройкой при использовании преобразования Гильберта в квадратурном модуляторе и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

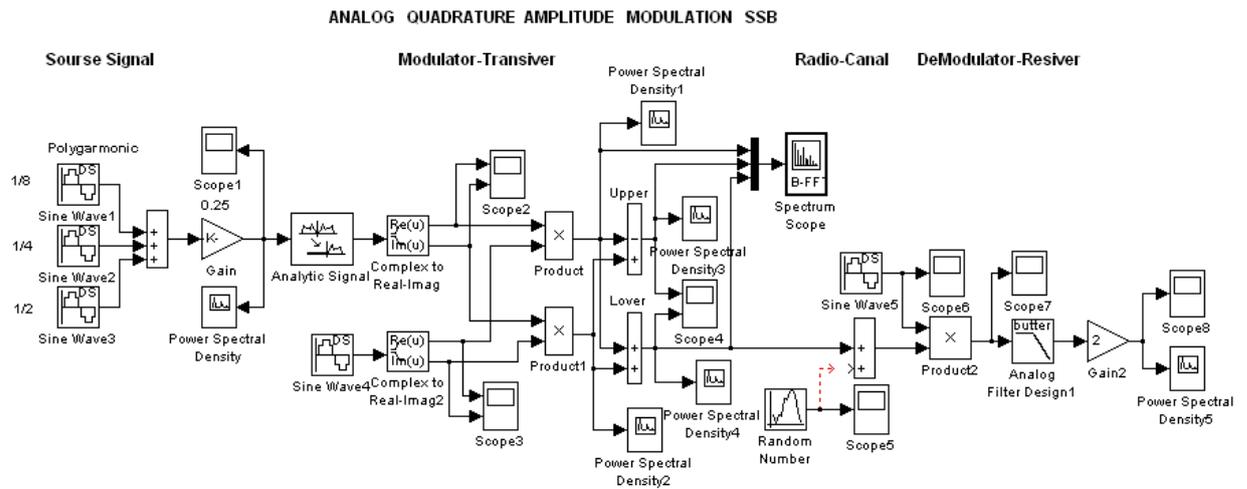


Рисунок 3.22 – Функциональная схема модема квадратурной (однополосной) аналоговой амплитудной модуляции с верхней и нижней настройкой при использовании преобразования Гильберта в квадратурном модуляторе и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

Передающая часть модема с верхней и нижней настройкой обеспечивает формирование однополосного радиосигнала как с верхними боковыми, так и нижними боковыми составляющими спектра. Приемная часть реализована для нижних боковых составляющих спектра.

На рисунках 3.23 – 3.25 приведены временное и спектральное представление радиосигналов квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции с верхней и нижней настройкой при использовании преобразования Гильберта в квадратурном модуляторе и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

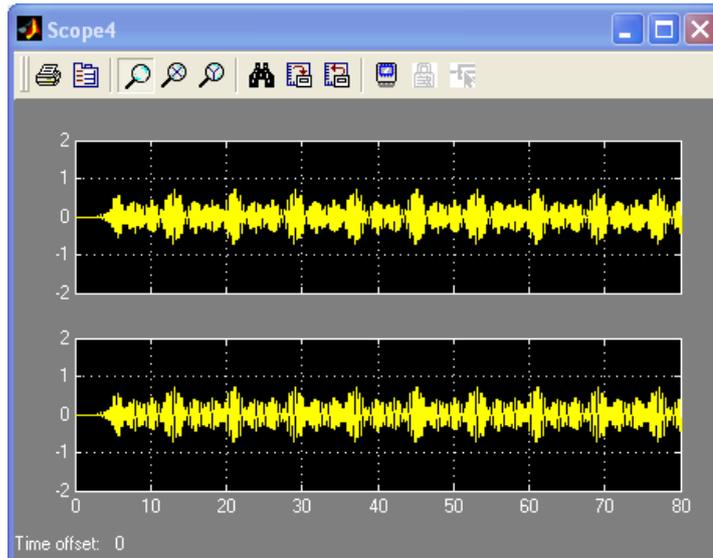


Рисунок 3.23 – Временное представление радиосигналов квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции с верхней и нижней настройках при использовании преобразования Гильберта в квадратурном модуляторе и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

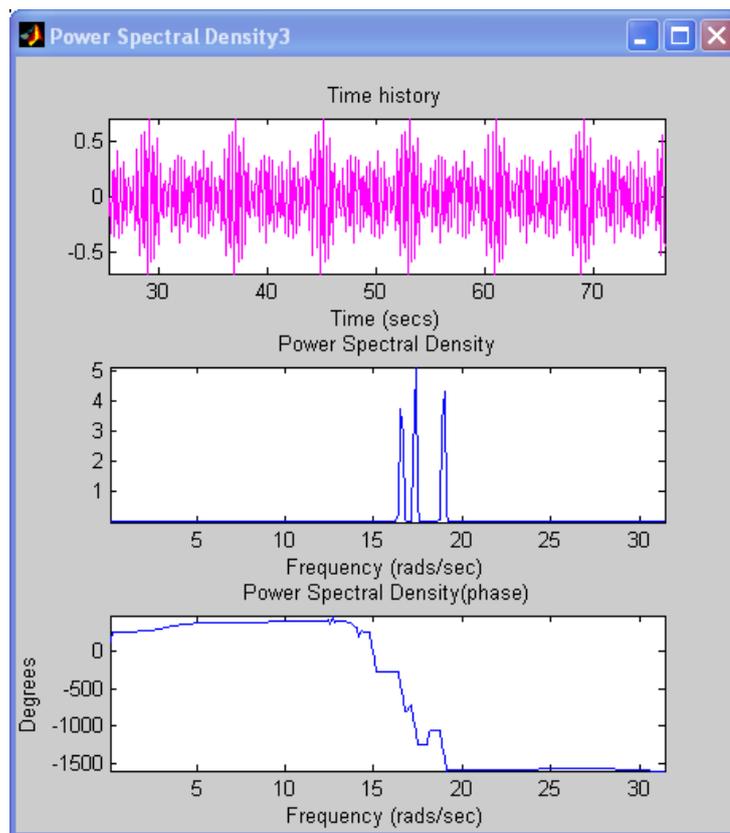


Рисунок 3.24 – Спектральное представление радиосигналов квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции с верхней настройкой при использовании преобразования Гильберта в квадратурном модуляторе и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

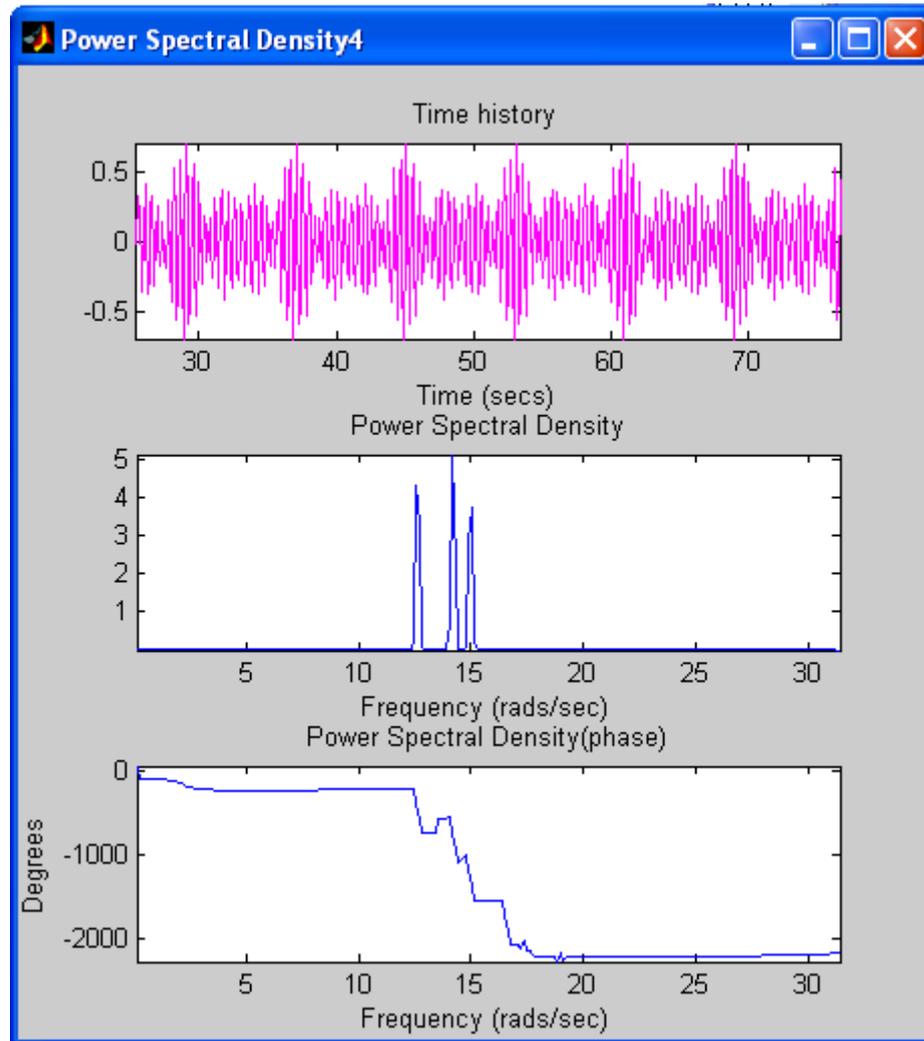


Рисунок 3.25 – Спектральное представление радиосигналов квадратурной (однополосной) аналоговой модуляции с нижней настройкой при использовании преобразования Гильберта в квадратурном модуляторе и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

Осциллограммы радиосигналов с квадратурной (однополосной) аналоговой амплитудной модуляцией свидетельствуют о сложном периодическом характере изменения амплитуды и фазы несущего колебания. Спектрограммы свидетельствуют об отсутствии в спектральной плотности мощности составляющей несущего колебания и верхних боковых составляющих спектра.

Таким образом, аналоговая амплитудная модуляция представлена функциональными схемами модемов с полной, балансной и квадратурной (однополосной) модуляциями в одноканальном и квадратурном исполнениях.

Угловая аналоговая модуляция представлена функциональными моделями модемов с частотной и фазовой модуляцией в одноканальном и квадратурном исполнении. **Результаты моделирования соответствуют малым индексам модуляции.**

На рисунке 3.26 приведена функциональная схема модема с частотной аналоговой модуляцией в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

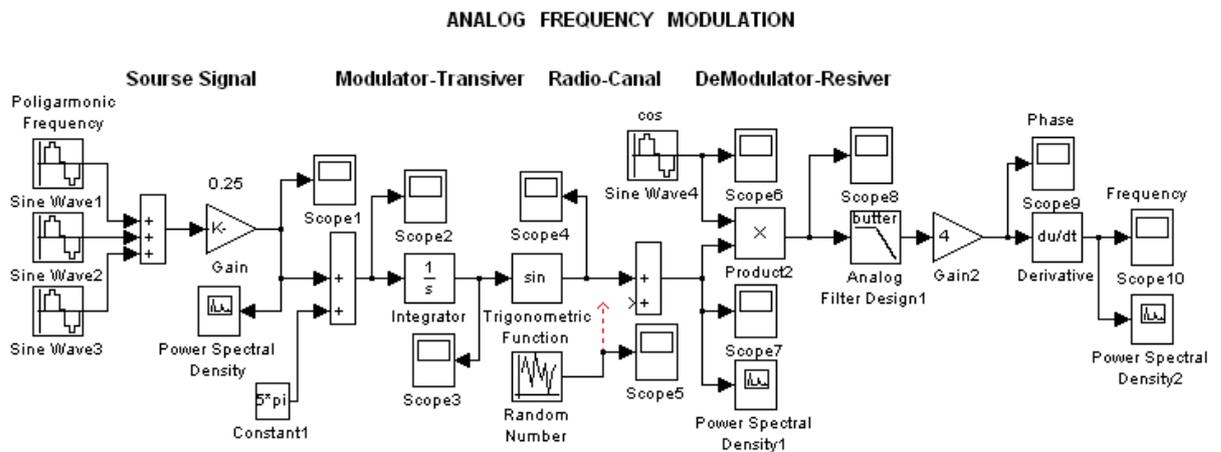


Рисунок 3.26 – Функциональная схема модема частотной аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунках 3.27 – 3.28 приведены временное и спектральное представление радиосигналов частотной аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

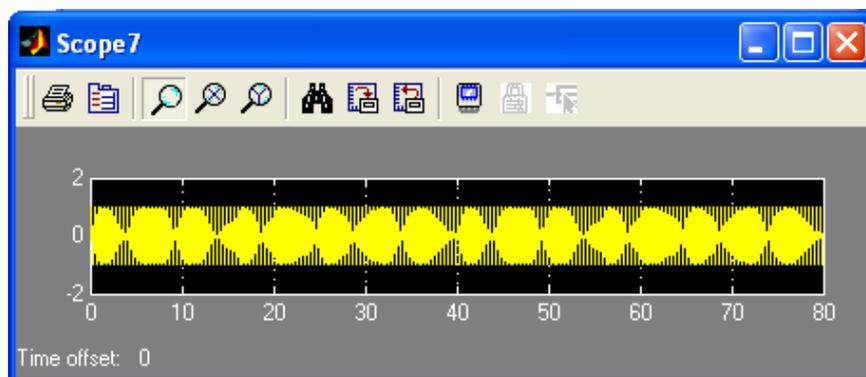


Рисунок 3.27 – Временное представление радиосигнала частотной аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

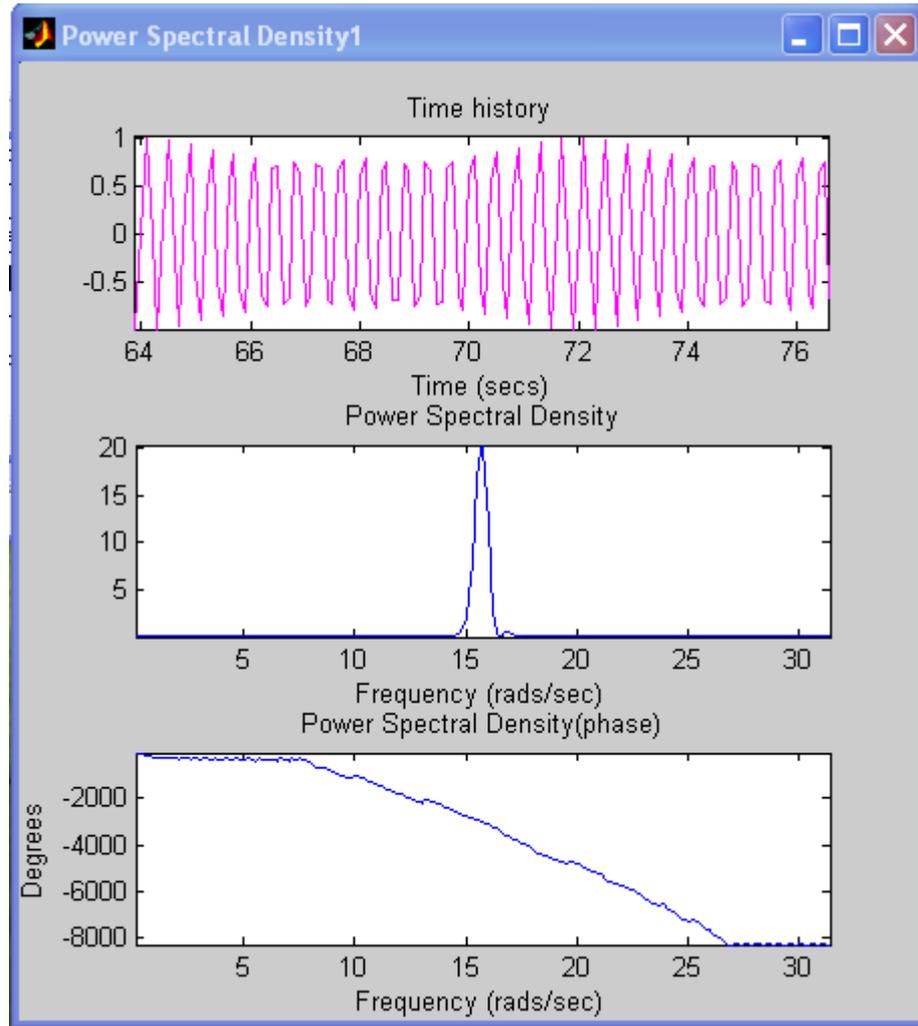


Рисунок 3.28 – Спектральное представление радиосигнала частотной аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунке 3.29 приведена функциональная схема модема с частотной аналоговой модуляцией при квадратурном исполнении демодулятора приемника и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

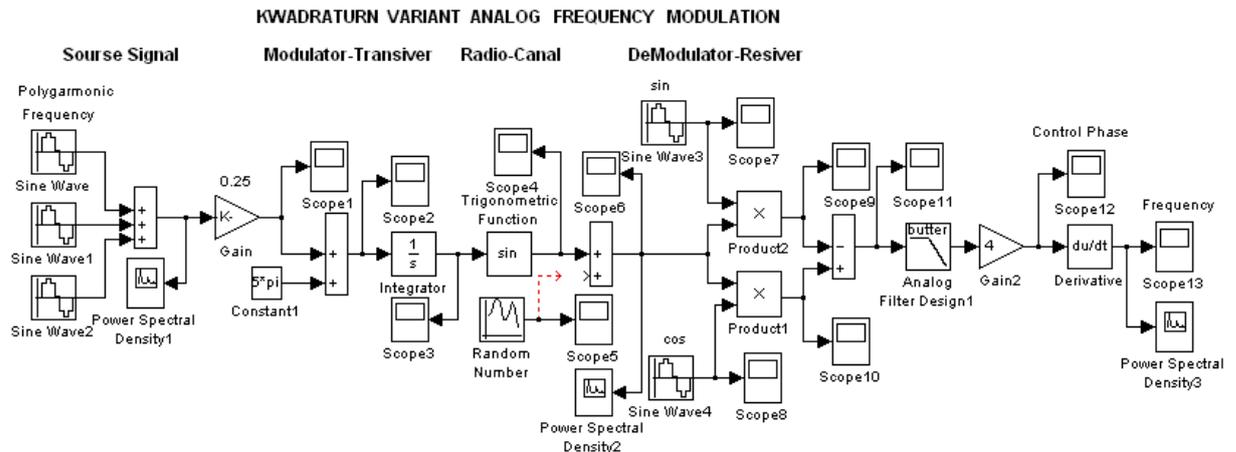


Рисунок 3.29 – Функциональная схема модема частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении демодулятора приемника и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунках 3.30 – 3.31 приведены временное и спектральное представление радиосигналов частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении демодулятора приемника и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

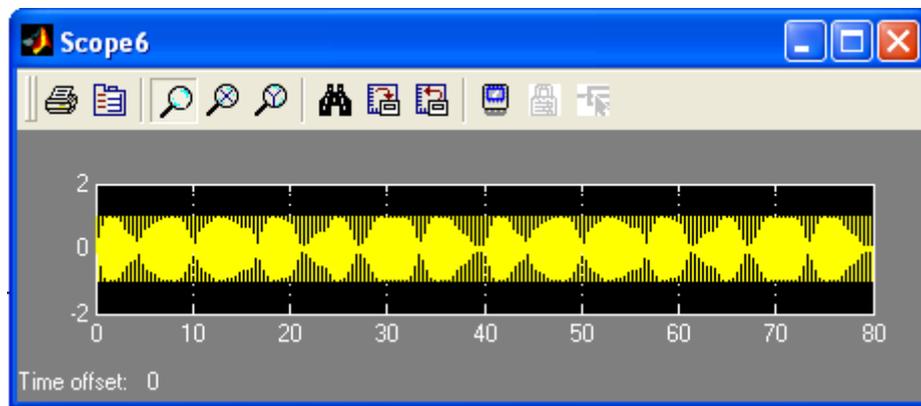


Рисунок 3.30 – Временное представление радиосигнала частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении демодулятора приемника и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

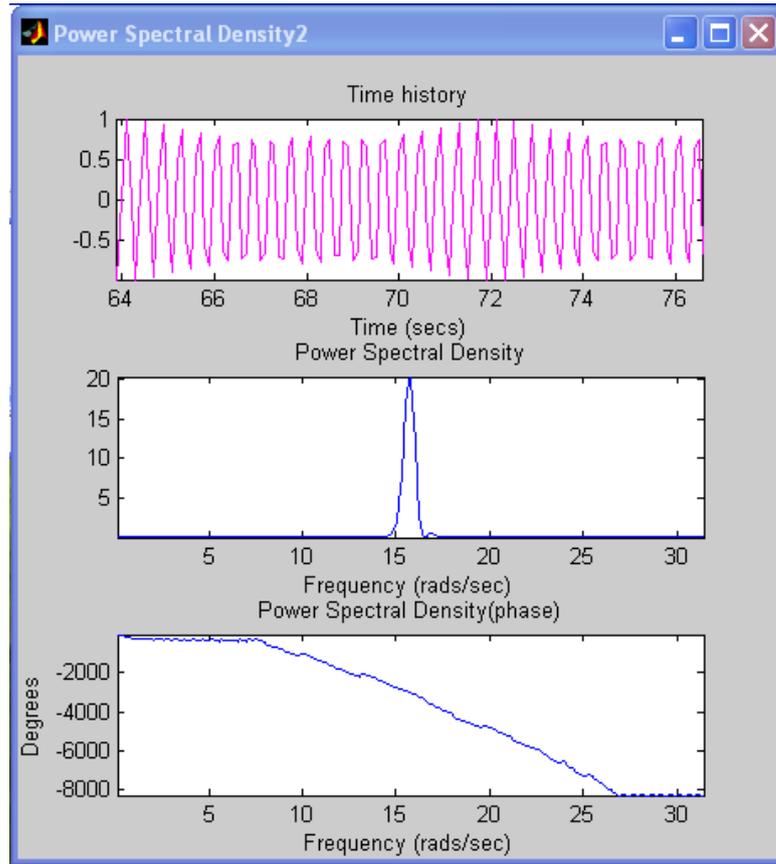


Рисунок 3.31 – Спектральное представление радиосигнала частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении демодулятора приемника и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунке 3.32 приведена функциональная схема модема с частотной аналоговой модуляцией при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

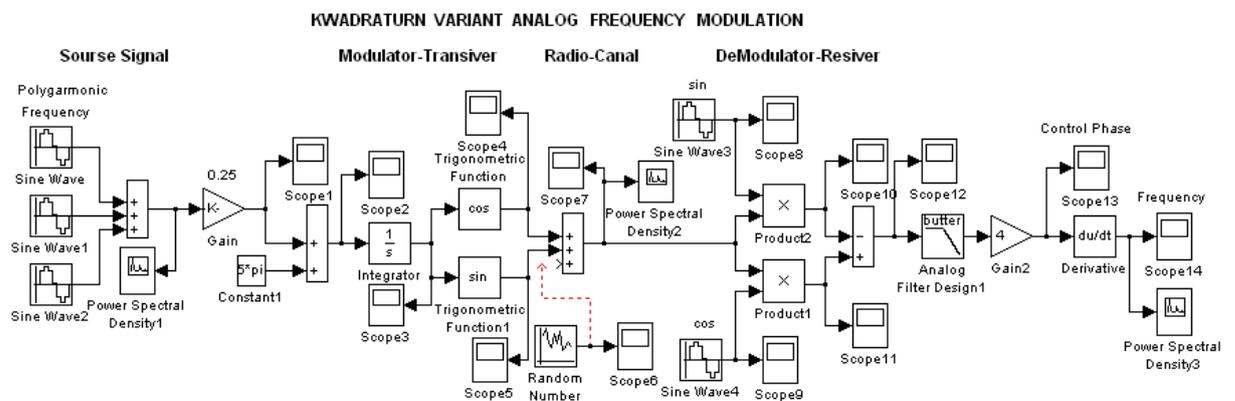


Рисунок 3.32 – Функциональная схема модема частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунках 3.33 – 3.34 приведены временное и спектральное представление радиосигналов частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

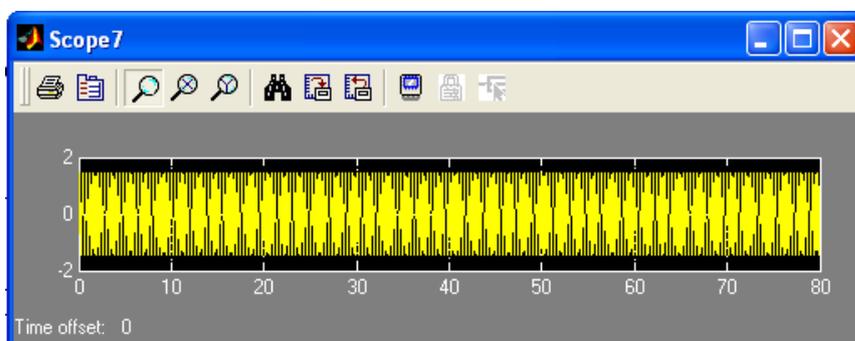


Рисунок 3.33 – Временное представление радиосигнала частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

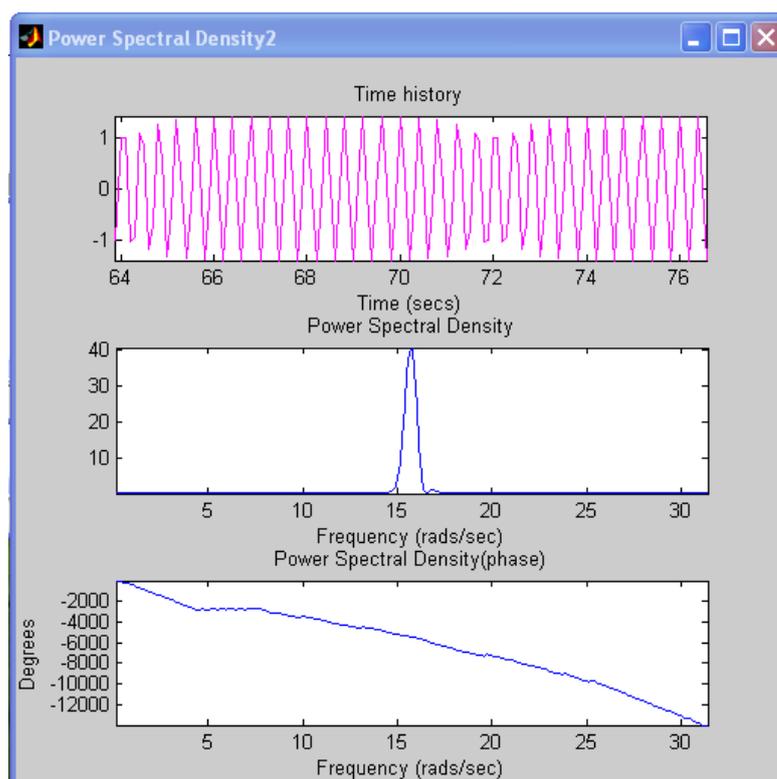


Рисунок 3.34 – Спектральное представление радиосигнала частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

Таким образом, аналоговая частотная модуляция представлена функциональными схемами модемов в одноканальном и квадратурном исполнениях.

На рисунке 3.35 приведена функциональная схема модема с фазовой аналоговой модуляцией в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

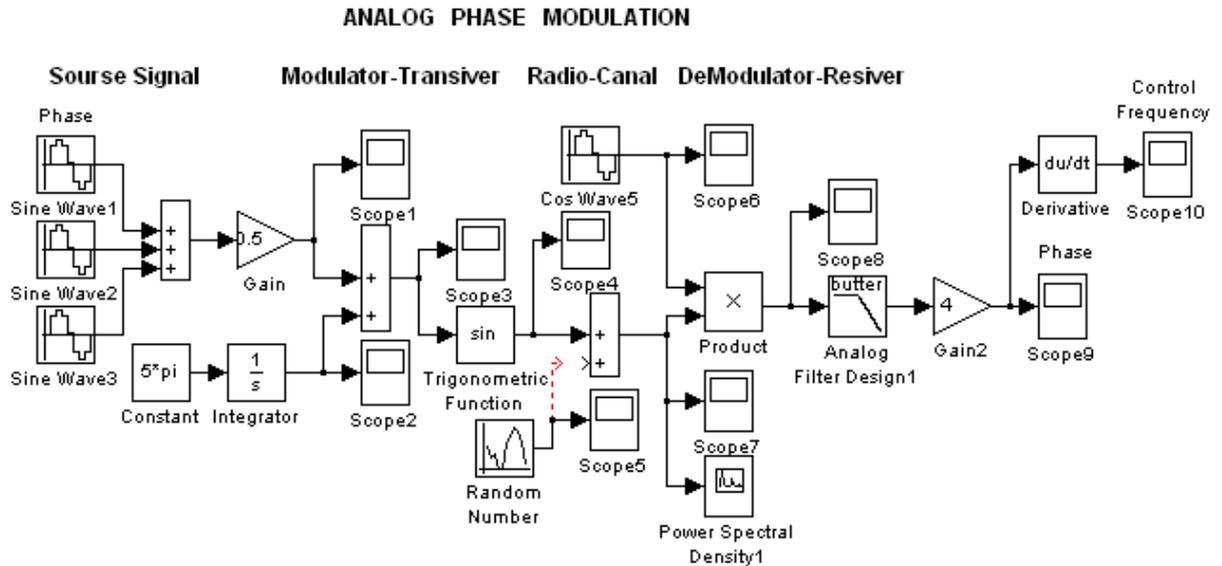


Рисунок 3.35 – Функциональная схема модема фазовой аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунках 3.36 – 3.37 приведены временное и спектральное представление радиосигналов фазовой аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

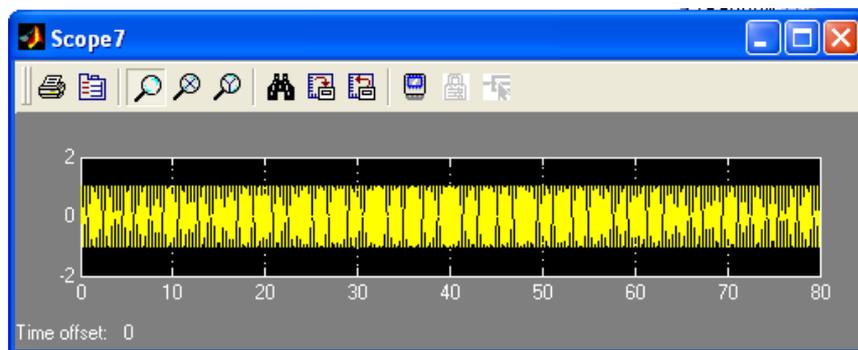


Рисунок 3.36 – Временное представление радиосигнала фазовой аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

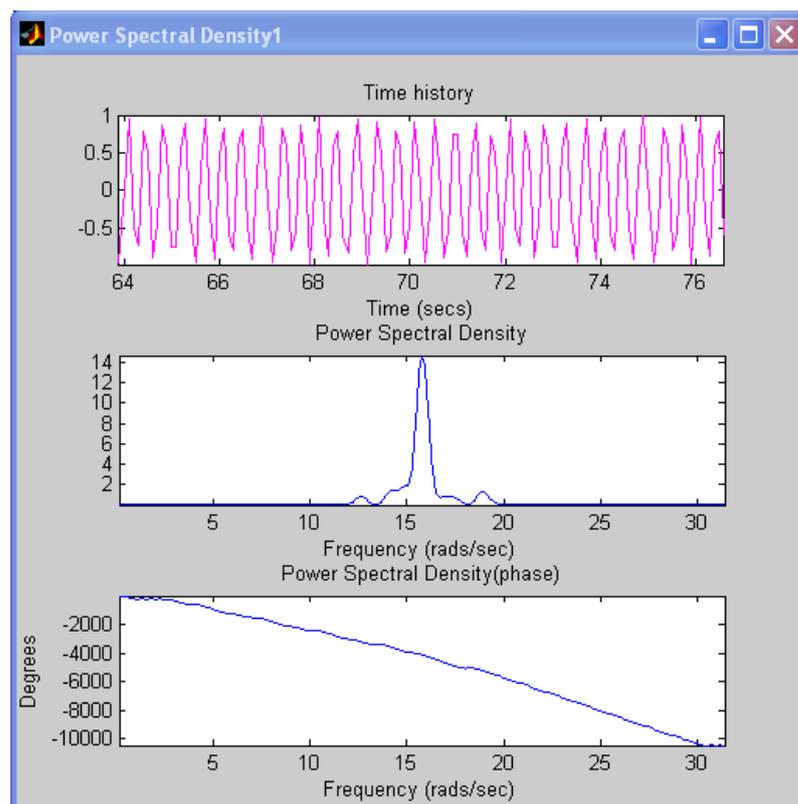


Рисунок 3.37 – Временное представление радиосигнала фазовой аналоговой модуляции в одноканальном исполнении и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунке 3.38 приведена функциональная схема модема с фазовой аналоговой модуляцией при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

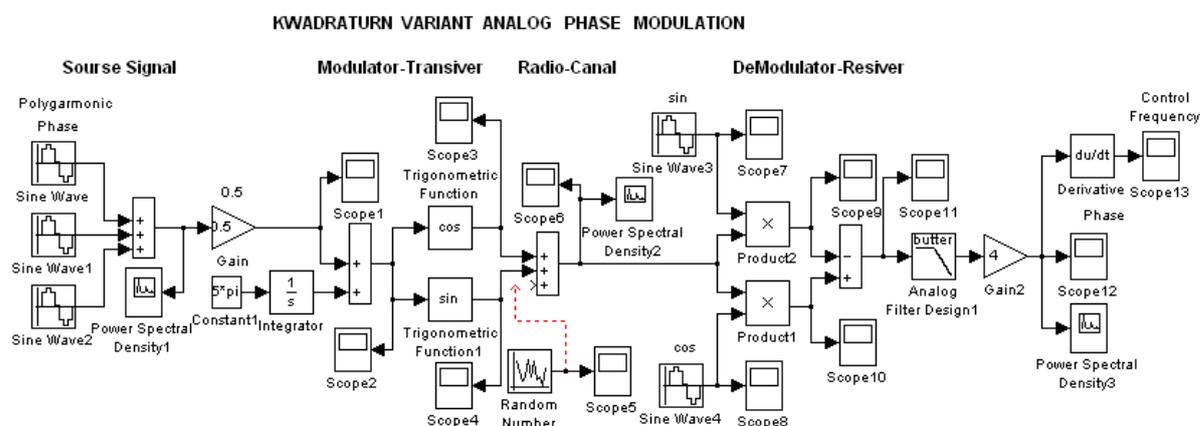


Рисунок 3.38 – Функциональная схема модема фазовой аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

На рисунках 3.39 – 3.40 приведены временное и спектральное представление радиосигналов частотной аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

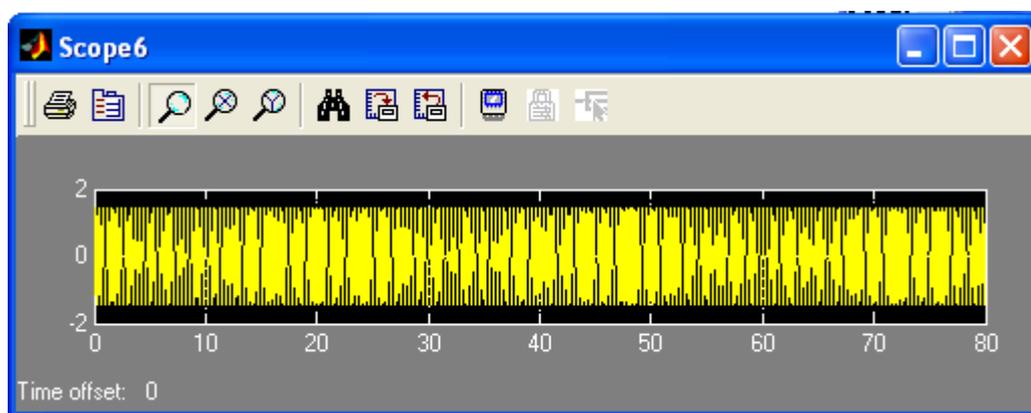


Рисунок 3.39 – Временное представление радиосигнала фазовой аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

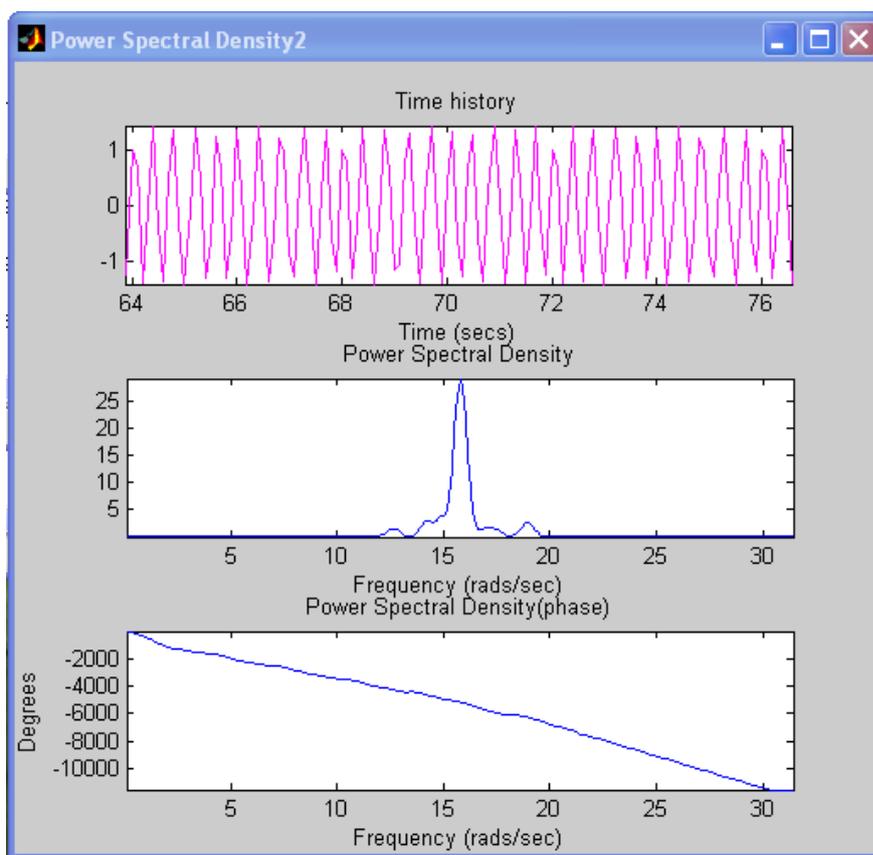


Рисунок 3.40 – Временное представление радиосигнала фазовой аналоговой модуляции при квадратурном исполнении модулятора и демодулятора и полигармоническом источнике модулирующего сигнала

Таким образом, аналоговая фазовая модуляция представлена функциональными схемами модемов в одноканальном и квадратурном исполнениях.

Выводы раздела. Использование метода прямого преобразования спектра позволило существенно упростить функциональные модели модемов с аналоговой и угловой модуляцией. Использование Simulink-моделей позволило раскрыть принципы модуляции, исследовать влияние параметров приемо-передающего тракта на передачу, прием и обработку аналоговых сигналов. Анализ измеряемых параметров аналоговых модулированных сигналов и предложенные схемы-алгоритмы измерения текущей мощности и точности воспроизведения принятого информационного сигнала позволят на программно-аппаратном уровне реализовать качественное измерение параметров сигналов с аналоговой модуляцией.

4. ЦИКЛ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО АНАЛОГОВЫМ МЕТОДАМ МОДУЛЯЦИИ. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ

Цикл лабораторных работ «Исследование методов аналоговой модуляции радиосигналов на функциональном уровне» посвящен модельному исследованию классических методов аналоговой модуляции с использованием пакета функционального моделирования **Simulink** системы для инженерных и научных расчетов **MatLab**.

Требования к отчету по лабораторной работе (по структуре):

- Титульный лист с указанием министерства, вуза, факультета, кафедры, названия работы, дисциплины, авторов исследований, преподавателя и дат.
- Цели и задачи лабораторной работы.
- Краткие теоретические сведения.
- Функциональная модель модема с кратким обоснованием структуры и описанием принципа работы.
- Пункты исследований влияния параметров модулированного сигнала на характеристики системы радиосвязи в целом. Выводы и рекомендации.
- Пункты исследований влияния параметров приемо-передающего тракта на характеристики системы радиосвязи в целом. Выводы и рекомендации.

- Пункты исследований влияния параметров модели канала распространения на характеристики системы радиосвязи в целом. Выводы и рекомендации.
- Выводы по работе в целом.

Методические указания по организации и проведению лабораторных работ:

- Допуск к работе и защита работы осуществляется преподавателем по контрольным вопросам.
- Отчет по работе выполняется один на подгруппу в электронной форме или в твердой копии в соответствии с требованием преподавателя. **Студент пропустивший занятия по расписанию представляет отчет в твердой копии индивидуально.**
- Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа: на выполнение отчетов по лабораторным работам, научно-технических отчетов, курсовых и дипломных проектов/работ.
- Выводы по пунктам исследований и работе в целом должны быть конкретны с указанием причинно-следственной связи наблюдаемых зависимостей и изменяемых параметров.
- При допуске к работе поощряется предъявление в электронном виде предварительной версии (домашней заготовки) отчета по лабораторной работе.
- Допуск и защита производится (по умолчанию) подгруппы в целом, в противном случае допуск и защита будут производиться индивидуально.
- Защита работы производится в конце текущего занятия либо в начале следующего занятия.
- Выводы подгрупп по пунктам исследований и отчеты в целом должны быть независимы и уникальны – уличение в плагиате равнозначно дисквалификации подгруппы.
- При выполнении лабораторных работ соблюдать “рабочую тишину”.
- Функциональные модели собирать постепенно и поэтапно, контролируя работоспособность и адекватность промежуточных зависимостей.

- Стараться модели собирать компактно и соблюдая выравнивание блоков в ряды, что способствует компактности и “читабельности” модели.
- Осциллограммы в контрольных точках модели следует масштабировать для повышения “разрешающей способности”.

Лабораторная работа №1 – Исследование модема с амплитудной модуляцией (АМ)

Цель работы: Используя теоретические сведения, материал фрагмента научно-технического отчета и среду функционального моделирования **Simulink**, исследовать модем на основе АМ-сигналов.

Задачи работы: Собрать функциональную модель модема на основе АМ-сигналов, исследовать основные параметры передачи, интерпретировать результаты исследований.

Лабораторное задание:

1. На основе представленного в пособии материала предложить простую функциональную модель модема, позволяющую исследовать параметры системы радиосвязи на основе АМ.
2. Предусмотреть перебор параметров модели АМ-сигналов и представить результаты исследований.
3. Предусмотреть перебор параметров модели приемо-передающего тракта и представить результаты исследований.
4. Предусмотреть возможность изменения параметров модели канала распространения и представить результаты исследований.
5. Результаты исследований оформить в виде отчета по лабораторной работе и представить к защите.

Вопросы для допуска к лабораторной работе:

1. Название лабораторной работы, цели и задачи.
2. Понятие несущего колебания.
3. Понятие модулирующего сигнала.
4. Отличие моно- гармонического от поли- гармонического модулирующего (сложного) сигнала и их спектральное отображение.
5. Параметр несущего колебания, подвергающийся изменению при АМ.
6. Рекомендуемые соотношения между верхней частотой спектра модулирующего сигнала и несущей частотой.
7. Необходимость использования модуляции несущего колебания при передаче сигналов и радиосвязи, принцип АМ, способы реализации.

8. Понятие глубины или индекса модуляции при **АМ** и пределы его изменения.

9. Особенности спектра **АМ**-сигнала.

10. Краткая характеристика среды функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab**.

11. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении источника модулирующего сигнала функциональной модели модема.

12. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении модулятора (передатчика) функциональной модели модема.

13. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении канала распространения радиосигнала функциональной модели модема.

14. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении демодулятора (приемника) функциональной модели модема.

15. Предполагаемая функциональная модель (схема) модема.

Вопросы, используемые при защите результатов лабораторной работы:

1. Суть метода прямого преобразования спектра, используемого при построении функциональной модели модема.

2. Функциональная модель (схема), используемая для исследования характеристик модема, как системы радиосвязи основанной на **АМ**.

3. Принцип функционирования модели (в целом).

4. Назначение блоков функциональной модели модема.

5. Какие параметры модулирующего сигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

6. Какие параметры модулятора (передающего тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

7. Какие параметры канала распространения радиосигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

8. Какие параметры демодулятора (приемного тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

9. Возможные варианты построения функциональной модели модема.

10. Отличительные особенности амплитудных модуляций **АМ**, **DSB**, **SSB**.

Лабораторная работа №2 – Исследование модема с балансной амплитудной модуляцией (DSB)

Цель работы: Используя теоретические сведения, материал фрагмента научно-технического отчета и среду функционального моделирования **Simulink**, исследовать модем на основе **DSB**-сигналов.

Задачи работы: Собрать функциональную модель модема на основе **DSB**-сигналов, исследовать основные параметры передачи, интерпретировать результаты исследований.

Лабораторное задание:

1. На основе представленного в пособии материала предложить простую функциональную модель модема, позволяющую исследовать параметры системы радиосвязи на основе **DSB**.
2. Предусмотреть перебор параметров модели **DSB**-сигналов и представить результаты исследований.
3. Предусмотреть перебор параметров модели приемо-передающего тракта и представить результаты исследований.
4. Предусмотреть возможность изменения параметров модели канала распространения и представить результаты исследований.
5. Результаты исследований оформить в виде отчета по лабораторной работе и представить к защите.

Вопросы для допуска к лабораторной работе:

1. Название лабораторной работы, цели и задачи.
2. Понятие несущего колебания.
3. Понятие модулирующего сигнала.
4. Отличие моногармонического от полигармонического модулирующего (сложного) сигнала и их спектральное отображение.
5. Параметр несущего колебания, подвергающийся изменению при **DSB**.
6. Рекомендуемые соотношения между верхней частотой спектра модулирующего сигнала и несущей частотой.
7. Необходимость использования модуляции несущего колебания при передаче сигналов и радиосвязи, принцип **DSB**, способы реализации.
8. Понятие глубины или индекса модуляции при **DSB** и пределы его изменения.
9. Особенности спектра **DSB**-сигнала.
10. Краткая характеристика среды функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab**.

11. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении источника модулирующего сигнала функциональной модели модема.

12. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении модулятора (передатчика) функциональной модели модема.

13. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении канала распространения радиосигнала функциональной модели модема.

14. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении демодулятора (приемника) функциональной модели модема.

15. Предполагаемая функциональная модель (схема) модема.

Вопросы, используемые при защите результатов лабораторной работы:

1. Суть метода прямого преобразования спектра, используемого при построении функциональной модели модема.

2. Функциональная модель (схема), используемая для исследования характеристик модема, как системы радиосвязи основанной на **DSB**.

3. Принцип функционирования модели (в целом).

4. Назначение блоков функциональной модели модема.

5. Какие параметры модулирующего сигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

6. Какие параметры модулятора (передающего тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

7. Какие параметры канала распространения радиосигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

8. Какие параметры демодулятора (приемного тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

9. Возможные варианты построения функциональной модели модема.

10. Отличительные особенности амплитудных модуляций **AM, DSB, SSB**.

Лабораторная работа №3 – Исследование модема с квадратурной амплитудной модуляцией (SSB)

Цель работы: Используя теоретические сведения, материал фрагмента научно-технического отчета и среду функционального моделирования **Simulink**, исследовать модем на основе **SSB**-сигналов.

Задачи работы: Собрать функциональную модель модема на основе **SSB**-сигналов, исследовать основные параметры передачи, интерпретировать результаты исследований.

Лабораторное задание:

1. На основе представленного в пособии материала предложить простую функциональную модель модема, позволяющую исследовать параметры системы радиосвязи на основе **SSB**.
2. Предусмотреть перебор параметров модели **SSB**-сигналов и представить результаты исследований.
3. Предусмотреть перебор параметров модели приемо-передающего тракта и представить результаты исследований.
4. Предусмотреть возможность изменения параметров модели канала распространения и представить результаты исследований.
5. Результаты исследований оформить в виде отчета по лабораторной работе и представить к защите.

Вопросы для допуска к лабораторной работе:

1. Название лабораторной работы, цели и задачи.
2. Понятие несущего колебания.
3. Понятие модулирующего сигнала.
4. Отличие моно- гармонического от поли- гармонического модулирующего (сложного) сигнала и их спектральное отображение.
5. Параметр несущего колебания, подвергающийся изменению при **SSB**.
6. Рекомендуемые соотношения между верхней частотой спектра модулирующего сигнала и несущей частотой.
7. Необходимость использования модуляции несущего колебания при передаче сигналов и радиосвязи, принцип **SSB**, способы реализации.
8. Понятие глубины или индекса модуляции при **SSB** и пределы его изменения.
9. Особенности спектра **SSB**-сигнала.
10. Краткая характеристика среды функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab**.
11. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении источника модулирующего сигнала функциональной модели модема.
12. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении модулятора (передатчика) функциональной модели модема.
13. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении канала распространения радиосигнала функциональной модели модема.

14. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении демодулятора (приемника) функциональной модели модема.

15. Предполагаемая функциональная модель (схема) модема.

Вопросы, используемые при защите результатов лабораторной работы:

1. Суть метода прямого преобразования спектра, используемого при построении функциональной модели модема.

2. Функциональная модель (схема), используемая для исследования характеристик модема, как системы радиосвязи основанной на **SSB**.

3. Принцип функционирования модели (в целом).

4. Назначение блоков функциональной модели модема.

5. Какие параметры модулирующего сигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

6. Какие параметры модулятора (передающего тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

7. Какие параметры канала распространения радиосигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

8. Какие параметры демодулятора (приемного тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

9. Возможные варианты построения функциональной модели модема.

10. Отличительные особенности амплитудных модуляций **AM, DSB, SSB**.

Лабораторная работа №4 – Исследование модема с фазовой модуляцией (PM)

Цель работы: Используя теоретические сведения, материал фрагмента научно-технического отчета и среду функционального моделирования **Simulink**, исследовать модем на основе **PM**-сигналов.

Задачи работы: Собрать функциональную модель модема на основе **PM**-сигналов, исследовать основные параметры передачи, интерпретировать результаты исследований.

Лабораторное задание:

1. На основе представленного в пособии материала предложить простую функциональную модель модема, позволяющую исследовать параметры системы радиосвязи на основе **PM**.

2. Предусмотреть перебор параметров модели **PM**-сигналов и представить результаты исследований.
3. Предусмотреть перебор параметров модели приемо-передающего тракта и представить результаты исследований.
4. Предусмотреть возможность изменения параметров модели канала распространения и представить результаты исследований.
5. Результаты исследований оформить в виде отчета по лабораторной работе и представить к защите.

Вопросы для допуска к лабораторной работе:

1. Название лабораторной работы, цели и задачи.
2. Понятие несущего колебания.
3. Понятие модулирующего сигнала.
4. Отличие моно- гармонического от поли- гармонического модулирующего (сложного) сигнала и их спектральное отображение.
5. Параметр несущего колебания, подвергающийся изменению при **PM**.
6. Рекомендуемые соотношения между верхней частотой спектра модулирующего сигнала и несущей частотой.
7. Необходимость использования модуляции несущего колебания при передаче сигналов и радиосвязи, принцип **PM**, способы реализации.
8. Понятие глубины или индекса модуляции при **PM** и пределы его изменения.
9. Особенности спектра **PM**-сигнала.
10. Краткая характеристика среды функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab**.
11. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении источника модулирующего сигнала функциональной модели модема.
12. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении модулятора (передатчика) функциональной модели модема.
13. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении канала распространения радиосигнала функциональной модели модема.
14. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении демодулятора (приемника) функциональной модели модема.
15. Предполагаемая функциональная модель (схема) модема.

Вопросы, используемые при защите результатов лабораторной работы:

1. Суть метода прямого преобразования спектра, используемого при построении функциональной модели модема.
2. Функциональная модель (схема), используемая для исследования характеристик модема, как системы радиосвязи основанной на **PM**.

3. Принцип функционирования модели (в целом).
4. Назначение блоков функциональной модели модема.
5. Какие параметры модулирующего сигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.
6. Какие параметры модулятора (передающего тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.
7. Какие параметры канала распространения радиосигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.
8. Какие параметры демодулятора (приемного тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.
9. Возможные варианты построения функциональной модели модема.
10. Отличительные особенности фазовой (FM) и частотной (FM) модуляций.

Лабораторная работа №5 – Исследование модема с фазовой модуляцией (FM)

Цель работы: Используя теоретические сведения, материал фрагмента научно-технического отчета и среду функционального моделирования **Simulink**, исследовать модем на основе FM-сигналов.

Задачи работы: Собрать функциональную модель модема на основе FM-сигналов, исследовать основные параметры передачи, интерпретировать результаты исследований.

Лабораторное задание:

1. На основе представленного в пособии материала предложить простую функциональную модель модема, позволяющую исследовать параметры системы радиосвязи на основе FM.
2. Предусмотреть перебор параметров модели FM-сигналов и представить результаты исследований.
3. Предусмотреть перебор параметров модели приемо-передающего тракта и представить результаты исследований.
4. Предусмотреть возможность изменения параметров модели канала распространения и представить результаты исследований.
5. Результаты исследований оформить в виде отчета по лабораторной работе и представить к защите.

Вопросы для допуска к лабораторной работе:

1. Название лабораторной работы, цели и задачи.

2. Понятие несущего колебания.
3. Понятие модулирующего сигнала.
4. Отличие моно- гармонического от поли- гармонического модулирующего (сложного) сигнала и их спектральное отображение.
5. Параметр несущего колебания, подвергающийся изменению при **FM**.
6. Рекомендуемые соотношения между верхней частотой спектра модулирующего сигнала и несущей частотой.
7. Необходимость использования модуляции несущего колебания при передаче сигналов и радиосвязи, принцип **FM**, способы реализации.
8. Понятие глубины или индекса модуляции при **FM** и пределы его изменения.
9. Особенности спектра **FM**-сигнала.
10. Краткая характеристика среды функционального моделирования **Simulink** системы **MatLab**.
11. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении источника модулирующего сигнала функциональной модели модема.
12. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении модулятора (передатчика) функциональной модели модема.
13. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении канала распространения радиосигнала функциональной модели модема.
14. Какие блоки библиотек **Simulink** предполагается использовать при построении демодулятора (приемника) функциональной модели модема.
15. Предполагаемая функциональная модель (схема) модема.

Вопросы, используемые при защите результатов лабораторной работы:

1. Суть метода прямого преобразования спектра, используемого при построении функциональной модели модема.
2. Функциональная модель (схема), используемая для исследования характеристик модема, как системы радиосвязи основанной на **FM**.
3. Принцип функционирования модели (в целом).
4. Назначение блоков функциональной модели модема.
5. Какие параметры модулирующего сигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.
6. Какие параметры модулятора (передающего тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.
7. Какие параметры канала распространения радиосигнала изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

8. Какие параметры демодулятора (приемного тракта) изменялись, пределы изменения, наблюдаемые зависимости, физическое обоснование, суждения об адекватности используемой модели.

9. Возможные варианты построения функциональной модели модема.

10. Отличительные особенности фазовой (PM) и частотной (FM) модуляций.

Таким образом, в пособии приведено описание 5-ти лабораторных работ по исследованию модемов с аналоговой модуляцией радиосигналов. Число лабораторных работ легко может быть увеличено, так как приведенный в пособии фрагмент н/т отчета содержит, по крайней мере, еще два варианта реализации **SSB** модема и еще два варианта модемов с угловой модуляцией (квадратурные реализации частотной (FM) и фазовой (PM) модуляции).

5. КРАТКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ НАД ДИСЦИПЛИНОЙ (ЛЕКЦИИ, ПРАКТИЧЕСКИЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ, КУРСОВАЯ РАБОТА/ПРОЕКТ)

Приступая к освоению дисциплины, каждый студент должен в процессе изучения найти для себя ответы на такие общие вопросы как:

- Цели и задачи дисциплины, история возникновения, область приложений.
- Круг изучаемых разделов, область приложений приобретаемых знаний умений и навыков.
- Область знаний, к которой относится дисциплина. Родственные дисциплины, основное отличие от родственных дисциплин.
- Насколько актуально изучение этой дисциплины для усвоения последующих дисциплин.
- Базовые понятия и определения дисциплины.
- Основные параметры и характеристики (показатели) устройств, средств и систем, изучаемых в дисциплине.
- Компромиссные отношения между показателями и природа их возникновения.
- Список рекомендуемой литературы и рекомендуемый преподавателем порядок прочтения источников.
- Основные знания, умения и навыки, формируемые дисциплиной и их значимость.

Рекомендации по освоению теоретического (лекционного) материала в процессе самостоятельной работы над дисциплиной:

- Обязательное ведение конспекта во время лекций либо при самостоятельном изучении. Оставление свободного места для последующего внесения уточнений и дополнений.
- Обращать пристальное внимание на цели, задачи, понятия и определения, параметры, характеристики.
- Все явные и пропущенные аналитические выкладки необходимо проследить и добиться полного понимания.
- Все встречающиеся умозаключения, следствия и выводы необходимо подвергать критическому осмыслению.
- Вести запись появляющихся при чтении и изучении вопросов для последующих консультаций.
- Волевой момент и внешние условия играют не последнюю роль при изучении дисциплины, поэтому для достижения цели необходимы определенные усилия, настойчивость и систематичность занятий.
- Желательно лекционный материал прорабатывать к началу следующей лекции, иначе скорость и степень усвоения теоретического материала резко снизятся.
- Постараться, возможно, с помощью преподавателя, понять какие пропущенные или слабо усвоенные разделы знаний препятствуют усвоению текущего материала и повторить его.

Рекомендации по освоению практического материала (примеры и задачи) в процессе самостоятельной работы над дисциплиной. Основная цель практических занятий, это усвоение основных взаимосвязей между параметрами и характеристиками, в связи с этим весьма желательно:

- Проследить все примеры и задачи, разбираемые в рекомендуемых учебниках и на лекциях.
- Внимательное прочтение условия задачи, существенно повысит Ваши шансы на успех.
- Перед решением задач перечитать теоретический материал по основным понятиям, определениям, параметрам и характеристикам.
- При возникновении затруднений, каждую используемую формулу проверять на “здравый смысл”, размерность и “предельный переход”.

- Обращать особое внимание на размерные единицы переменных, входящих в формулы и выражения, поскольку встречаются ситуации, когда используются переменные не в системе СИ.

Рекомендации по освоению лабораторного практикума в процессе самостоятельной работы над дисциплиной. Основная цель лабораторных занятий, это усвоение в процессе лабораторных исследований основных взаимосвязей между параметрами и характеристиками, в связи с этим весьма желательно:

- Ознакомиться с функциональной или иной средой, её возможностями при моделировании реальных процессов, явлений, устройств, узлов, средств, систем.
- Постараться вникнуть в цели, задачи и пункты задания предстоящей лабораторной работы, возможности предлагаемой среды моделирования, что позволит, опираясь на теоретические знания, предложить модель и составить план исследований.
- При подготовке к лабораторной работе протестировать незнакомые блоки на предмет влияния параметров на характеристики и по возможности отработать модели отдельных узлов.
- При выполнении лабораторной работы не собирать сразу модель целиком, а постепенно наращивать её, контролируя адекватность результатов и работоспособность.
- При выполнении лабораторной работы не следует останавливаться на одном варианте реализации, а постараться поискать альтернативные варианты.
- При усложнении модели использовать блоки подсистем, куда сносить законченные узлы.
- Затратить усилия на разработку универсального шаблона отчета по лабораторной работе, хотя бы для данной дисциплины, что позволит существенно экономить временные затраты.
- Процесс подготовки к лабораторной работе совместить с подготовкой шаблона отчета предстоящей работы.
- При подготовке отчета следует скопировать как саму модель, так и осциллограммы в контрольных точках.

Рекомендации по выполнению курсового проекта/работы в процессе самостоятельной работы над дисциплиной. Основная цель

курсового проекта/работы, это усвоение на примере расчета конкретного задания основных взаимосвязей между параметрами и характеристиками, в связи с этим весьма желательно:

- Обратить внимание на существующие типовые решения, используемый набор основных элементов и их характеристики (параметры), влияние характеристик (параметров) отдельных узлов и блоков на результирующие характеристики систем.
- Проанализировать пункты технического задания на предмет особенностей, влекущих замену типового решения на оригинальное.
- Максимально использовать имеющиеся методические пособия по курсовому проектированию и справочную литературу.
- Целесообразно при расчетах использовать компьютер не в режиме “калькулятора”, а, используя системы типа **MathCad, SciLab, MatLab, Maple V**, написать простую программу расчетов, которая позволит легко вносить коррективы и существенно экономит время.
- Пояснительные записки оформляются в соответствии с **ГОСТ** на оформление технической документации, курсовых и дипломных проектов.
- При возможности следует подкрепить расчеты моделированием на **ЭВМ**, используя соответствующий пакет программ.
- При выполнении проекта/работы основное внимание уделять требованиям **ТЗ**, обоснованию принятых решений, простоте практической реализуемости и максимальной эффективности.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефедов В. И. Основы радиоэлектроники и связи: Учеб. пособие/ В.И. Нефедов, А.С. Сигов; Под ред. В. И Нефедова. – М.: Высшая школа, 2009.- 735 с.
2. Каганов В.И. Основы радиоэлектроники и связи: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2006.- 542 с.
3. Головин О.В. Радиосвязь. 3-е изд. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2012.- 286 с.
4. Черных И. В. **SIMULINK**: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных; ред.: В. Г. Потемкин. - М.: Диалог-МИФИ, 2004. - 496 с.
5. Андреевская Т.М. Основы радиоэлектроники и связи / <http://jstonline.narod.ru/rsw/>

6. Орлов И.Я., Односецев В.А., Ивлев Д.Н., Лупов С.Ю. Основы радиоэлектроники: Электронное учебное пособие / Н./Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И.Лобачевского, 2011. - 169 с.
http://www.takelink.ru/knigi_uchebniki/radioelektronika/62215-orlov-iy-a-i-dr-osnovy-radioelektroniki.html
7. Спектр сигналов с угловой модуляцией
<http://www.dsplib.ru/content/fmspectr/fmspectr.html>
8. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники / Евгений Иванович Манаев. – 3 - е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1990. - 512 с.