

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

Кафедра радиоуправления и связи

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

по дисциплине (модулю)

«Основы теории радиолокационных систем и комплексов»

Направление подготовки

11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Направленность (профиль) подготовки

Радиоэлектронные системы передачи информации

Уровень подготовки специалитет

Программа подготовки специалитет

Квалификация выпускника – инженер Форма обучения – очная

Рязань 2025

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение структуры сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ.
2. Изучение принципов построения радиолинии КИМ-ЧИМ-ФМ.
3. Изучение влияния шума на работу радиолинии.
4. Изучение работы системы синхронизации.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Вводные замечания

Необходимость достоверного приема цифровой информации при больших дальностях и жестких ограничениях на габаритные размеры, массу и потребляемую мощность в значительной мере определяет структуру радиолинии. Приемный тракт должен проектироваться таким образом, чтобы в нем отсутствовал эффект подавления сигнала шумом. Это достигается, если на входе нелинейных элементов (детекторов) обеспечивается большое отношение сигнал/шум.

В реальных радиолиниях такое условие достаточно просто достигается при импульсных методах модуляции сигнала, например при ВИМ-АМ. Однако такие радиолинии не нашли широкого применения, так как возникают трудности при проектировании бортовых передатчиков с большой пиковой мощностью, необходимых при организации радиолинии большой протяженности. Кроме того, импульсный режим затрудняет совмещение линий передачи информации с траекторными измерениями, так как он мало пригоден для точного измерения скорости по доплеровскому сдвигу частот. Поэтому широкое применение находят непрерывные сигналы. Как правило, для их модуляции используют фазовые (или синхронные) детекторы.

При передаче цифровой информации на первой ступени чаще всего используется кодоимпульсная модуляция (КИМ). В сигналах с двумя ступенями модуляции (КИМ-ФМ, КИМ-АМ, КИМ-ЧМ) сигнал КИМ (т.е. последовательность символов) непосредственно модулирует несущую. Непосредственная модуляция несущей позволяет более экономно использовать полосу частот, отведенную для радиолинии. Такие сигналы более пригодны для высоких скоростей передачи информации (мегабиты/с), что характерно для радиолиний сравнительно малой дальности (до тысяч км).

В сигналах с трехступенчатыми видами модуляции (КИМ-ЧМ-ФМ, КИМ-ФМ-ФМ, КИМ-ЧИМ-ФМ и др.) сигналом КИМ модулируется поднесущая, а затем – несущая. Занимаемая полоса частот увеличивается. Однако такая структура сигнала оказывается более удобной для построения демодуляторов. С помощью поднесущих создается дополнительная частотная селекция для защиты от сосредоточенных помех. Сигналы с поднесущими характерны для космических радиолиний протяженностью вплоть до сотен миллионов километров. На таких дальностях может быть достигнута скорость передачи информации порядка сотен кбит.

При проектировании приемных устройств радиолиний необходимо искать такие технические решения, которые обеспечат оптимальную структуру приемника при заданном критерии качества.

Очень часто радиолинию стремятся проектировать таким образом, чтобы минимизировать вероятность $P_{ош}$ ошибочного приема элементарных символов («1» или «0»). Минимальная

вероятность $P_{ош}$ достигается при использовании оптимальных приемников, в которых для определения параметров принимаемых сигналов формируется функция правдоподобия и ищется ее максимум. Однако практическая реализация такого оптимального приемника может быть затруднена, так как функция правдоподобия представляет собой в общем случае многомодальную трехмерную функцию.

Вместо оптимальных приемников используют более простые. Платой за простоту приемников является увеличение вероятности $P_{ош}$ при той же мощности передатчика.

Наиболее часто проектируются приемники, в которых для демодуляции несущей используется когерентное опорное колебание. В качестве демодулятора применяется синхронный детектор, а опорное напряжение формируется с помощью системы фазовой подстройки (ФАПЧ) с дополнительными устройствами для поиска и захвата частоты.

Когерентные радиолинии по своим характеристикам позволяют обеспечить вероятности ошибочного приема $P_{ош}$, близкие к аналогичным вероятностям оптимального приемника при простой технической реализации.

Существуют два основных подхода при построении когерентных радиолиний. Первый подход основан на том, что в спектре радиосигнала существует спектральная составляющая на

несущей частоте, которая выделяется системой ФАПЧ и используется в качестве опорного сигнала при синхронном детектировании. Но эта составляющая не несет полезной информации и с точки зрения передачи сообщений энергия на ее передачу расходуется напрасно.

Второй подход основан на использовании сигналов с подавленной несущей. Чтобы обеспечить работу ФАПЧ, радиосигнал подвергается нелинейному преобразованию для формирования когерентного опорного сигнала.

2. Структура и спектр сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ

Сигнал КИМ-ЧИМ-ФМ является одним из наиболее часто применяемых при организации цифровой связи по радиоканалам большой длительности. Символы сигнала КИМ заполняются прямоугольными колебаниями (меандром) разной частоты для нулей и единиц. Сигналом КИМ-ЧИМ модулируется по фазе несущее колебание.

Аналитическая запись сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ имеет вид:

$$U_c(t) = U_0 \sin \left[\omega_0 t + \Psi e(t) \right]$$

где $e(t) = 0,5 \left[1 + \Pi_c(t) \right] \Pi_{m1}(\omega_1 t) + 0,5 \left[1 - \Pi_c(t) \right] \Pi_{m2}(\omega_2 t)$;
 $\Pi_{m1}(\omega_1 t)$ и $\Pi_{m2}(\omega_2 t)$ – колебания прямоугольной формы (меандр) с частотами ω_1 и ω_2 , используемыми на второй ступени модуляции сигнала; $\Pi_c(t)$ – последовательность положительных и отрицательных прямоугольных импульсов, т.е. сигнал КИМ; Ψ определяет порядок следования элементарных символов.

Общий вид спектра изображен на рис. 1.

Рис. 1. Спектр сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ

Интенсивность непрерывной части спектра на частотах $\omega_0 \pm \omega_1$ и $\omega_0 \pm \omega_2$, т.е. величина A , равна:

$$A = \frac{8}{\pi} \int_0^{\tau_0} U^2 \sin^2 \phi P(1) [1 - P(1)] \tau_0$$

где ϕ^s – девиация на последней ступени модуляции; $P(1)^s$ – вероятность появления единиц в сигнале КИМ; τ_0 – длительность элементарного символа.

Спектр сигнала изображен для случая, когда $P(1) = P(0)$. Если $P(1) \neq P(0)$, форма спектра изменится. В частности, не будут равны непрерывные части спектра на частотах $\omega_0 \pm \omega_1$, $\omega_0 \pm \omega_2$.

Характерной особенностью спектра сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ является отсутствие спектральных составляющих на четных гармониках частот ω_1 и ω_2 .

3. Демодуляция сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ

Для модуляции сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ наиболее целесообразно использовать когерентное детектирование (рис. 2).

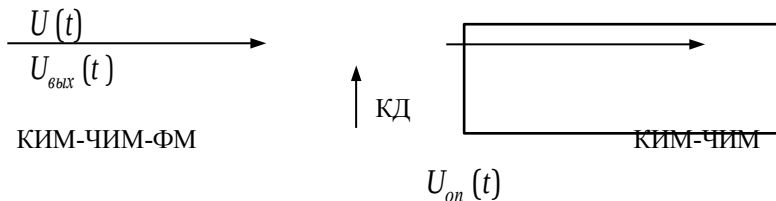


Рис. 2. Упрощенная схема демодулятора КИМ-ЧИМ-ФМ

Если использовать в качестве опорного напряжения $U_{on}(t)$, которое определяется $U_{on}(t) = \cos \omega_0 t$, то на выходе когерентного (фазового) детектора будет сигнал вида КИМ-ЧИМ.

Для получения опорного напряжения $U_{on}(t)$ при установлении связи с подвижными объектами используются следящие фильтры, выполняемые на основе систем ФАПЧ. При использовании сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ работа системы ФАПЧ облегчается, так как в окрестностях частоты ω_0 нет спектральных составляющих передаваемого сообщения. Фазовая погрешность системы ФАПЧ (понимаемая как разность фаз между сигналом гетеродина и идеальным опорным напряжением) будет определяться формулой:

$$\sigma_\phi^2 \approx N_0 \Delta f_{ш} / P_{сн},$$

где N_0 – спектральная плотность мощности белого шума на входе ФАПЧ; $\Delta f_{ш}$ – шумовая полоса ФАПЧ; $P_{сн}$ – мощность спектральной составляющей, используемой для синхронизации.

4. Сравнение помехоустойчивости радиолиний КИМ-ФМ и КИМ-ЧИМ-ФМ

Радиолиния КИМ-ФМ при идеально работающем синхронном детекторе (т.е. когда его опорное напряжение полностью когерентно с несущей) позволяет минимизировать вероятность ошибочного приема $P_{ош}$. В идеальной радиолинии КИМ-ФМ опорное напряжение формируется из принятого колебания. Поскольку спектр сигнала КИМ-ФМ имеет вид, показанный на рис. 3, то в шумовую полосу системы ФАПЧ будут попадать спектральные составляющие, соответствующие передаваемому сигналу КИМ. Воздействие этих спектральных составляющих будет аналогично воздействию шума и приведет к дополнительной фазовой нестабильности опорного напряжения.

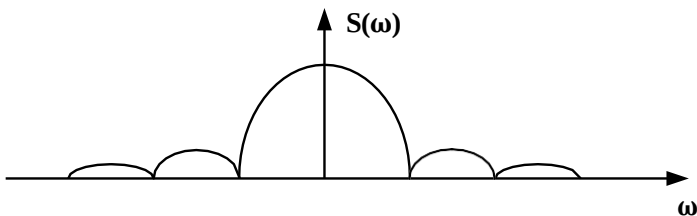


Рис. 3. Спектр сигнала КИМ-ФМ

При сравнении двух сигналов необходимо, чтобы для обоих сигналов были одинаковыми нестабильности опорного напряжения, вырабатываемого системой ФАПЧ, а также вероятности ошибок при приеме символов в информационном канале. Лучшим будет считаться тот сигнал, для которого потребуется меньше энергии.

Для сигнала КИМ-ФМ дисперсия фазы опорного напряжения равна

$$\sigma_{\phi_1}^2 = \frac{N_0 \Delta f_{ш}}{P_{c1} \cos^2 \phi_1} + \frac{tg^2 \phi_1 \Delta f_{ш}}{2}$$

Для сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ дисперсия фазы определяется только шумовой составляющей

$$\sigma_{\phi_2}^2 = \frac{N_0 \Delta f_{ш}}{P_{c2} \cos^2 \phi_2}$$

В этих формулах P_{c1} и P_{c2} – мощности сигналов; ϕ_1 и ϕ_2 – девиации частоты.

Вероятность ошибочного приема символа в радиолинии КИМ-ФМ определяется формулой

$$P_{ош1} = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}} \sin \phi_1 \right) \right]$$

а в радиолинии КИМ-ЧИМ-ФМ вероятность ошибки равна

$$P_{ош2} = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}} \sin \phi_2 \right) \right]$$

где E – энергия сигнала; Φ – интеграл вероятности.

Отметим, что при идеально работающем когерентном детекторе и при работе с подавленной несущей ($\phi = \pi/2$) сигнал

КИМ-ФМ требует при условии $P_{ош1} = P_{ош2}$ вдвое меньшей энергии сигнала.

Используя приведенные формулы, можно получить соотношение, необходимое для обеспечения равных условий в обоих каналах:

$$\frac{h_{01}}{h_{02}} = \left(1 + \frac{a_1}{2}\right) \left[1 + (1 + a_1) \sin^2 \phi_1\right],$$

где h_0 – отношение сигнал/шум; $a_1 = h_{01} \sin^2 \psi_1$.

Анализ полученного выражения позволяет установить, что уже при девиации фазы $\phi > 45^\circ$ сигнал КИМ-ФМ энергетически более выгоден, чем сигнал КИМ-ЧИМ-ФМ. Однако увеличение девиации фазы приводит к увеличению фазовой погрешности, которая должна быть малой. При большой ϕ_1 фазовую нестабильность можно уменьшить, лишь уменьшая величину $\Delta f_{ш} \tau_0$. Но это далеко не всегда возможно. Уменьшение $\Delta f_{ш}$ ограничено появлением динамических погрешностей ФАПЧ. Длительность символа τ_0 задается скоростью передачи информации. Поэтому при больших скоростях передачи информации (что характерно для радиолиний небольшой дальности) сигнал КИМ-ФМ предпочтительней. При малых скоростях передачи информации радиолиния КИМ-ЧИМ-ФМ имеет преимущество.

5. Цифровая модель радиолинии КИМ-ЧИМ-ФМ

В лабораторной работе изучается цифровая модель радиолинии КИМ-ЧИМ-ФМ, реализованная программно. Структурная схема передающей части изображена на рис. 4.

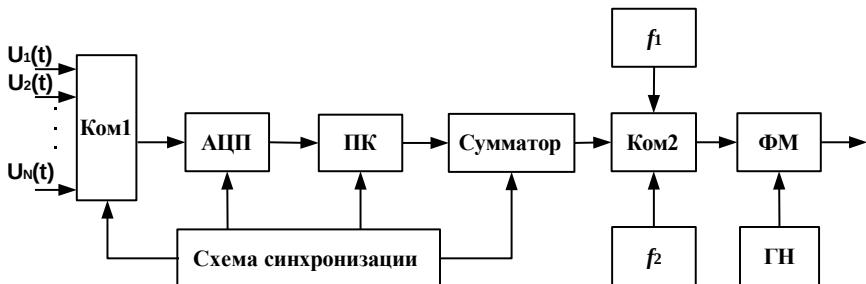


Рис. 4. Структурная схема передающей части радиолинии КИМ-ЧИМ-ФМ: Ком1 и Ком2 – коммутаторы; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – преобразователь кода; f_1 и f_2 – генераторы поднесущих; ФМ – фазовый модулятор; ГН – генератор несущей

На вход коммутатора 1 поступают N передаваемых сообщений $U_1(t), U_2(t) \dots U_N(t)$. С помощью АЦП они преобразуются в цифровой код. Преобразователь кода ПК служит для преобразования кода в последовательный. Схема синхронизации СС управляет работой передающей части и вырабатывает следующие сигналы.

1. Сигналы управления коммутатором Ком1. Эти сигналы имеют частоту повторения, определяемую верхней частотой спектра передаваемых сообщений.
2. Сигналы управления АЦП.
3. Сигналы управления преобразователем кода ПК.
4. Сигнал кадровой синхронизации. Как правило, в качестве сигнала синхронизации используется усеченная М-последовательность.

М-последовательность является периодической с периодом, состоящим из N импульсов. Усеченной М-последовательностью называют непериодическую последовательность длиной N , где

$N = 2^k - 1$. Автокорреляционная функция такой последовательности

имеет величину боковых пиков, близкую к $1/\sqrt{N}$, а величина центрального пика пропорциональна N . Поэтому с ростом N величина боковых пиков уменьшается.

Для формирования М-последовательности используют сдвигающий регистр, состоящий из триггерных ячеек и сумматора по модулю 2. На рис. 5 приведен пример формирования М-последовательности с $N=7$.

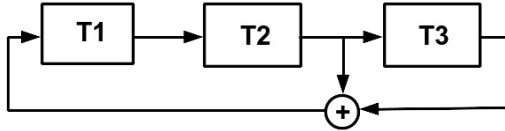


Рис. 5. Формирование М-последовательности

На триггеры поступают тактовые импульсы (на рисунке не показаны), следующие с частотой $1/\tau$, где τ – длительность формируемого импульса. Каждый тактовый импульс вызывает изменение состояния (напряжения на выходе) всех триггеров. При этом напряжение на выходе каждого триггера (символ) становится равным напряжению на его входе для предыдущего такта. Символы могут принимать два значения: 0 и 1. При суммировании любых комбинаций входных символов на выходе сумматора получаются только символы 1 и 0. После 7 тактов состояния регистров повторяются. Если символы непрерывно считывать со входа T1, то получим периодическую последовательность: 011001011100101110... с периодом, равным 7. Отметим, что в исходном состоянии хотя бы на одном из выходов триггеров символ должен отличаться от нуля, так как нулевая комбинация (000) приводит к обращению в ноль всех символов во всех остальных комбинациях.

С помощью сумматора формируется сигнал на видеочастоте (рис. 6).

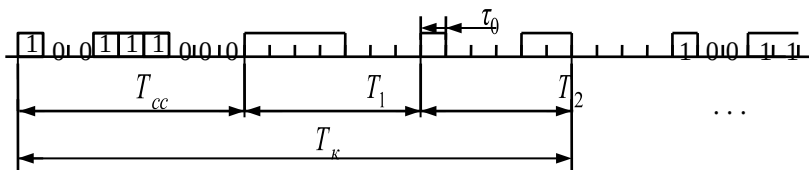


Рис. 6. Структура группового сигнала на выходе сумматора:

$T_{сс}$ – длительность слова синхронизации;

T_1 или T_2 – длительность информационного

слова;

τ_0 – длительность элементарного символа;

$T_к$ – длительность кадра

Рис. 7. Структурная схема приемной части радиолинии
КИМ-ЧИМ-ФМ

С нулевым порогом сравниваются отсчеты сигнала, снимаемые с выхода схемы разности. Формирователь Ф2 формирует импульсы заданной амплитуды и длительности. С выхода Ф2 снимается поток решений о символах, представляющий собой поток элементарных символов. Распределитель каналов содержит счетчик числа импульсов в командном слове и демультиплексор, которые обеспечивают распределение принимаемой информации по потребителям.

Система тактовой синхронизации необходима для того, чтобы опрашивать решающее устройство в моменты времени, соответствующие середине символа. Местный тактовый генератор МТГ вырабатывает меандр тактовой синхронизации. Формирователь Ф1, содержащий формирователь импульсов и линию задержки, формирует последовательность коротких импульсов с частотой f_m . С помощью линии задержки происходит выбор оптимального момента

стробирования. Для слежения за тактовой частотой используется система ФАПЧ, работающая следующим образом. Сигнал с выхода вычитающего устройства поступает на резонансный фильтр РФ, настроенный на частоту $0,5 f_m$. С помощью удвоителя и УРФ получаем частоту f_m , которая отсутствует в спектре принятого сигнала. Этот сигнал является синхронизирующим для местного тактового генератора МТГ.

С помощью системы кадровой синхронизации происходит формирование колебаний с частотой следования кадров. Подстройка частоты местного генератора МГ осуществляется следующим образом. Дешифратор Дш М-последовательности и согласованный с ней фильтр СФ выделяют момент окончания кадрового синхрослова. Выходные импульсы СФ, сформированные по амплитуде и длительности формирователем ФЗ, сравниваются в цифровом фазовом детекторе ЦФД с колебаниями местного генератора МГ. Управляющий сигнал, изменяющий частоту местного генератора, снимается с ФНЧ. Меандр с выхода местного генератора управляет работой распределителя каналов РК.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С разрешения преподавателя включить компьютер. В папке «Lab» найти файл «Thimeb.exe» и запустить его. Ознакомиться с порядком выполнения работы, выведенным на монитор.
2. Введите «1» (номер выполняемого пункта). Зарисуйте осциллограммы и спектры в характерных точках передатчика, соблюдая очередность контрольных точек. Аналогично исследуйте работу приемника.
3. Введите «2». Постройте зависимость мощности переходных помех от разнаса частот, используя данные таблицы. Сделайте вывод о выборе оптимального разнаса частот.
4. Введите «3». Зарисуйте осциллограммы и постройте зависимость мощности переходных помех от ширины полосы пропускания ПФ, используя данные таблицы. Объясните полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сравните спектры сигналов КИМ-ЧИМ-ФМ и КИМ-ЧМ-ФМ.
2. Формирование сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ.

3. Работа передающей части радиолинии.
4. Работа схемы синхронизации передатчика.
5. Работа приемной части радиолинии.
6. Как организована пословная синхронизация в приемнике?
7. Как организована покадровая синхронизация в приемнике?
8. Как организована посимвольная синхронизация в приемнике?
9. Свойства М-последовательности.
10. Формирование М-последовательности.
11. Сравнение инерционной и безынерционной систем синхронизации.
12. Объясните временные диаграммы, снятые с экрана монитора.
13. Объясните преобразование спектров сигналов в радиолинии.
14. Чем определяется вероятность ошибочного приема? Как ее рассчитать?
15. Сравните пропускную способность радиолиний с КИМ-ЧИМ-ФМ и КИМ-ФМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиосистемы передачи информации/ под ред. И.Б. Федорова, В.В. Калмыкова. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 472 с.
2. Пенин П.И. Системы передачи цифровой информации. М.: Сов. радио, 1976.
3. Березин А.В., Вейцель В.А. Теория и проектирование радиосистем. М.: Сов. радио, 1977.
4. Радиосистемы передачи информации / под ред. И.И.Теплякова. М.: Радио и связь, 1982.
5. Основы радиопередачи/ под ред. В.А. Вейцеля. М.: Радио и связь, 1995. 327 с.

УДК 621.396

Командная радиолиния КИМ-ЧИМ-ФМ: методические указания к лабораторной работе № 6/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: В.С. Паршин, М.В. Кулакова. Рязань, 2019. 12 с.

Изложены особенности передачи и приема цифровых сигналов с частотно-импульсной манипуляцией.

Предназначены для студентов 4-го курса специальности 11.05.01 факультета радиотехники и телекоммуникаций.

Ил. 7. Библиогр.: 5 назв.

Командная радиолиния, спектр, фазовая автоподстройка частоты, синхронизация

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиоуправления и связи Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. С.Н. Кириллов)

Командная радиолиния КИМ-ЧИМ-ФМ

Составители: П а р ш и н Валерий Степанович
К у л а к о в а Марина Васильевна

Редактор М.Е. Цветкова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать __.__.19 Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

5378

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Ф.УТКИНА**

КОМАНДНАЯ РАДИОЛИНИЯ КИМ-ЧИМ-ФМ

Методические указания к лабораторной работе № 6

Рязань 2019

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение системы управления в радиозоне.
2. Исследование воздействия шумов на точность управления.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Принцип действия

Пусть в пункте управления (ПУ) расположена передающая антенна, диаграмма направленности которой с максимумом, развернутым на угол φ от оси Z , периодически с частотой манипуляции $F_{\text{МН}}$ переключается из положения "1" в положение "2", находясь в обоих положениях одинаковое время, равное $T_{\text{МН}}/2$ (рис. 1). Амплитудное равносигнальное направление, формируемое в плоскости OZ , называется радиозоной. В пределах радиозоны амплитуда несущего колебания, излучаемого передатчиком ПУ, не меняется при переключении диаграммы направленности антенны из положения "1" в положение "2". Чтобы определить направление отклонения ЛА от радиозоны, сигналы, излучаемые антенной в положениях "1" и "2" ее диаграммы направленности, имеют характерные отличия, "окраску". "Окраска" сигналов обеспечивается амплитудной модуляцией несущего колебания поднесущими частотами $F_{\text{П1}}$ и $F_{\text{П2}}$.

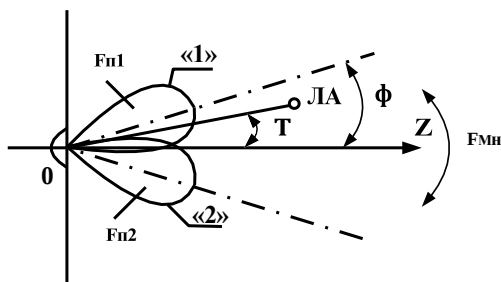


Рис. 1. Формирование радиозоны

Временная структура сигнала, принимаемого летательным аппаратом (ЛА) при различных его положениях относительно равносигнальной зоны, и соответствующий спектральный состав приведены на рис. 2.

В общем случае в состав спектра принимаемого сигнала

входят три группы частот:

- $f_n \pm (2n-1)F_{MH}$;
- $f_n \pm [F_{n1} \pm (2n-1)F_{MH}]$;
- $f_n \pm [F_{n2} \pm (2n-1)F_{MH}]$.

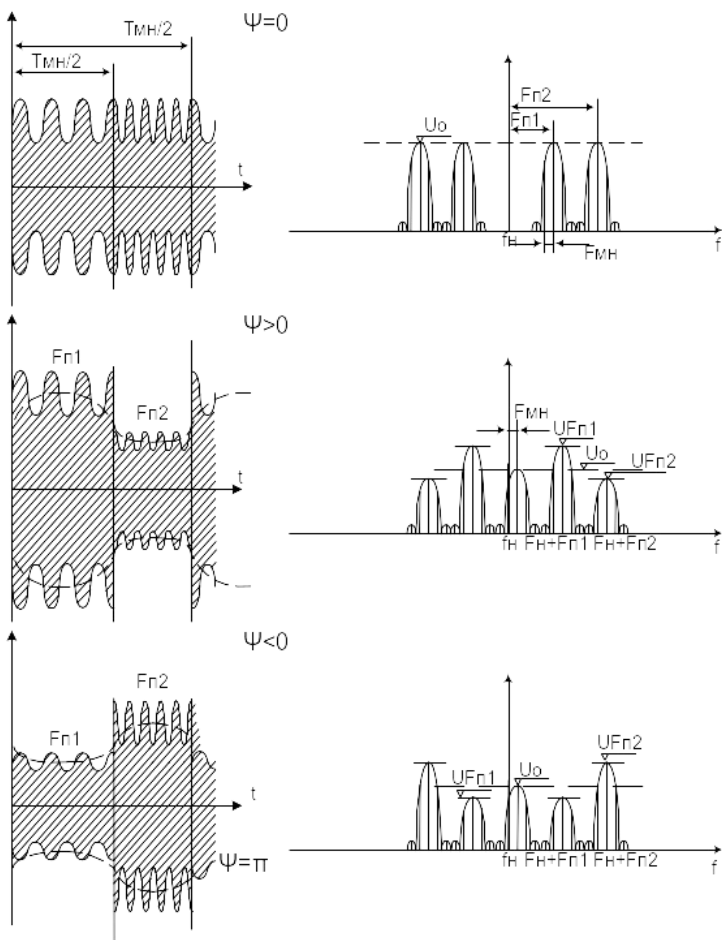


Рис. 2. Временная и спектральная структуры сигналов, принимаемых ЛА при различных Ψ

При нахождении ЛА в радиозоне принимаемый сигнал модулирован только поднесущими частотами. В спектре отсутствуют боковые составляющие первой группы частот, а мощности гармоник

по второй и третьей группам частот одинаковы. При отклонении ЛА от радиозоны принимаемый сигнал оказывается дополнительно промодулированным по амплитуде прямоугольными колебаниями частоты манипуляции диаграммы направленности антенны. При этом в спектре сигнала появляются боковые частоты в окрестностях частоты несущего колебания и изменяется относительный уровень спектральных составляющих, обусловливаемых частотами поднесущих.

Итак, информация о местоположении ЛА в принимаемом на его борту сигнале заключена:

- 1) в глубине амплитудной модуляции несущего колебания сигналом частоты манипуляции F_{MH} и в фазе этого сигнала; при этом значение коэффициента амплитудной модуляции m_A характеризует величину углового отклонения ЛА от радиозоны, а фаза огибающей - направление отклонения;
- 2) в соотношении мощностей по второй и третьей спектральным группам сигнала; при этом значение коэффициента мощностной модуляции m_P характеризует величину углового отклонения ЛА от радиозоны, а знак " $\pm$ " коэффициента m_P указывает направление отклонения.

Информационные параметры сигнала m_P и m_A связаны с угловым отклонением Ψ ЛА от радиозоны следующими зависимостями:

$$m_A = K_{P3} \psi, \quad (1)$$

$$m_P = 1 + 4 \cdot K_{P3} \psi, \quad (2)$$

где K_{P3} - коэффициент чувствительности равносигнальной зоны.

Структурная схема аппаратуры пункта управления, предназначенная для формирования в пространстве радиозоны, приведена на рис. 3.

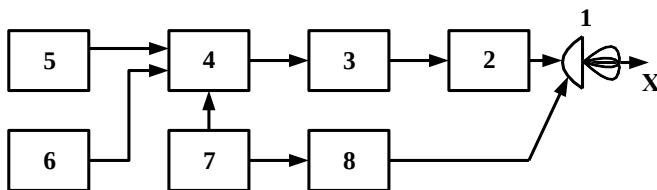


Рис. 3. Структурная схема аппаратуры пункта управления:
1 - антенна; 2 - генератор ВЧ несущего колебания; 3 - амплитудный

модулятор; 4 - переключатель поднесущих частот; 5, 6 - генераторы поднесущих частот; 7 - генератор манипуляционной частоты; 8 - переключатель положений диаграммы направленности

Равносигнальная зона создается за счет переключения диаграммы направленности передающей антенны. Частота переключений (манипуляции) $F_{\text{мн}} = 1/T_{\text{мн}}$ задается генератором манипуляционной частоты 7. Диаграмма направленности находится в положениях 1 и 2 одинаковое время, равное $T_{\text{мн}}/2$. Модуляция несущего колебания осуществляется с помощью генераторов поднесущих частот 5 и 6, которые подключаются к модулятору 3 передатчика через переключатель 4.

Бортовая аппаратура ЛА может выполняться в двух вариантах в зависимости от используемого для формирования команды информационного параметра - m_A или m_P .

Рассмотрим вначале вариант бортовой аппаратуры ЛА на основе информационного параметра m_A – коэффициента амплитудной модуляции несущего колебания частотой манипуляции диаграммы передающей антенны (рис. 4).

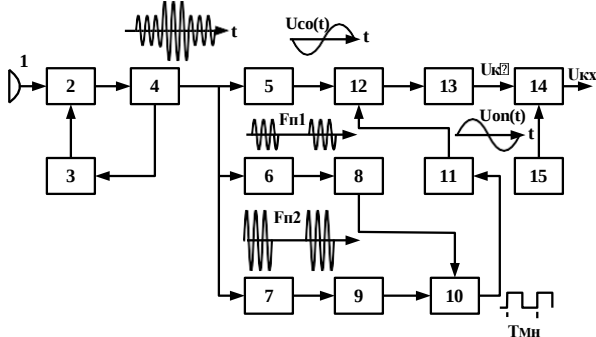


Рис. 4. Структурная схема аппаратуры ЛА при формировании командного сигнала на основе информационного параметра m_A :

1 - антенна; 2 - тракт ВЧ; 3 - система АРУ; 4 - детектор несущего колебания; 5 - фильтр сигнала ошибки; 6, 7 - фильтры поднесущих частот; 8, 9 - детекторы поднесущих частот; 10 - триггер; 11 - фильтр опорного сигнала; 12 - фазовый детектор; 13 - фильтр командного сигнала; 14 - потенциометр дальности; 15 - программный механизм

Сигнал, принятый приемной антенной, после усиления и преобразования в ВЧ тракте детектируется амплитудным детектором.

Низкочастотная часть приемника разделена на два канала: канал сигнала ошибки и канал опорного сигнала. Сигнал с выхода

амплитудного детектора 4 параллельно подается на фильтр сигнала ошибки 5, настроенный на частоту манипуляции $F_{мн}$, и на фильтры поднесущих частот 6 и 7. С выхода фильтра сигнала ошибки 5 снимается гармоническое колебание, амплитуда которого пропорциональна коэффициенту модуляции m_A , т.е. угловому отклонению Ψ ЛА от радиозоны, а фаза зависит от направления отклонения.

Полосовые фильтры поднесущих частот 6 и 7, детекторы поднесущих частот 8 и 9, триггер 10 и фильтр опорного сигнала 11 образуют опорный канал.

Опорный сигнал и сигнал ошибки поступают на фазовый детектор 12, который осуществляет их перемножение. После фильтра

командного сигнала 13 выделяется командное напряжение $U_{\kappa\psi}$, величина и знак которого определяется величиной и направлением отклонения ЛА от радиозоны.

Потенциометр дальности, формирующий командный сигнал $U_{\kappa x}$, пропорциональный линейному отклонению ЛА от радиозоны, управляется программным механизмом.

Командный сигнал $U_{\kappa\psi}$, формируемый на борту ЛА, связан с угловым отклонением ЛА от радиозоны зависимостью:

$$U_{\kappa\psi} = K_{\partial\psi} K_{\partial\dot{\psi}} \dot{E}_{\partial\dot{\psi}} U_{mo} \sqrt{\frac{R_{\partial\dot{\psi}} P_{\partial\dot{\psi}} D_{\partial\dot{\psi}} S_{\partial\dot{\psi}}}{2\pi r_{\max}^2}} \psi, \quad (3)$$

где $K_{\partial\psi}$ - коэффициент передачи фазового детектора, $K_{\partial\dot{\psi}}$ - коэффициент усиления канала сигнала ошибки, U_{mo} - уровень опорного напряжения, $R_{\partial\dot{\psi}}$ - входное сопротивление приемной антенны, $P_{\partial\dot{\psi}}$ - мощность передатчика ПУ, $D_{\partial\dot{\psi}}$ - коэффициент направленного действия передающей антенны ПУ, $S_{\partial\dot{\psi}}$ - эффективная площадь приемной антенны ЛА, $r_{\max}$ - максимальное удаление ЛА от ПУ, на которое рассчитано управление.

Теперь рассмотрим вариант построения бортовой аппаратуры ЛА на основе информационного параметра m_r – отношение мощностей по второй и третьей спектральным группам сигнала (рис. 5). В этом варианте после амплитудного детектора несущего колебания 4 сигнал разделяется на два канала. В первом канале (фильтр поднесущего колебания $F_{п1}$ 5, выпрямитель 7, пиковый детектор 9) формируется напряжение, пропорциональное мощности сигнала, связанного с первой поднесущей частотой $F_{п1}$, а во втором канале (фильтр поднесущего колебания $F_{п2}$ 6, выпрямитель 8, пиковый детектор 10) -

напряжение, пропорциональное мощности сигнала, связанного со второй поднесущей частотой $F_{п2}$. Формируемые в указанных каналах напряжения равны, когда ЛА находится в равносигнальной зоне. Если снаряд находится вне равносигнальной зоны, напряжения в первом и втором каналах различны. Из разности этих напряжений формируется командный сигнал, пропорциональный отклонению снаряда от радиозоны.

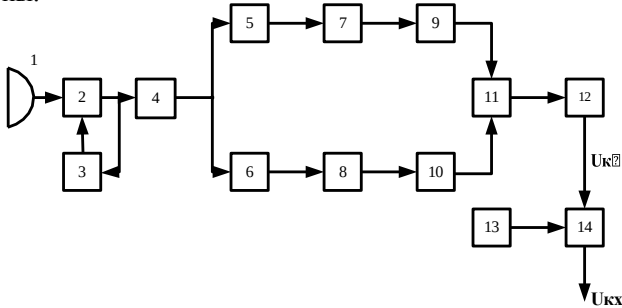


Рис. 5. Структурная схема аппаратуры ЛА при формировании командного сигнала на основе информационного параметра m_p :

1 - антенна; 2 - тракт ВЧ; 3 - система АРУ; 4 - детектор несущего колебания; 5,6 - фильтры поднесущих частот; 7, 8 - выпрямители; 9, 10 - пиковые детекторы; 11 - разностный каскад; 12 - фильтр нижних частот; 13 - потенциометр дальности; 14 - программный механизм

2. Контур управления

На основании принципа работы системы и ее функционального построения можно построить структурную схему замкнутого контура (рис. 6). Направление полета ЛА определено равносигнальной зоной, и управление подчинено условию $\Psi_3=0$. Фактическое направление движения ЛА характеризуется углом отхода Ψ , являющимся ошибкой управления. Угловая ошибка управления подается на радиозвено РЗ, связывающее угловое отклонение ЛА от радиозоны ψ с командным напряжением U_k . Эта связь осуществляется так.

Первый элемент радиозвена преобразует угловое отклонение Ψ ЛА от радиозоны в коэффициент амплитудной модуляции m_A несущей частоты частотой манипуляции $F_{мн}$. Коэффициент передачи первого элемента равен угловой чувствительности равносигнальной зоны

$$K_1 = K_{P3} = m_A / \psi$$

(4)

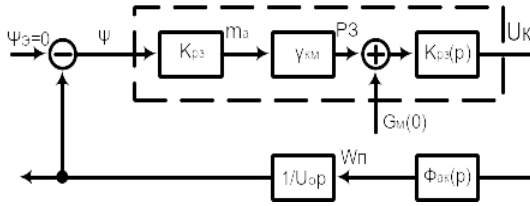


Рис. 6. Контур управления

Вторым элементом радиозвена является преобразователь коэффициента амплитудной модуляции m_a в командное напряжение. Коэффициент передачи преобразователя

$$\gamma_{\text{кт}} = U_k / M_A = K_{\text{д}} K_{\text{со}} U_{\text{то}} \sqrt{R_{\text{вх}} P_{\text{пер}} D_{\text{пер}} S_{\text{ант}} / 2 \pi r_{\text{max}}^2} \Psi \quad (5)$$

Третий элемент радиозвена - фильтр командного сигнала с передаточной функцией $K_{\text{рз}}(p)$, при этом $K_{\text{рз}}(0)=1$.

Выработанное командное напряжение подается на звено автопилот - корпус, передаточная функция которого $\Phi_{\text{ак}}(p)$, а выходной величиной является поперечное ускорение $W_{\text{п}}$. Новое угловое положение ЛА связывается с поперечным ускорением динамическим звеном. Передаточная функция динамического звена (ДЗ)

$$\Phi_{\text{ДЗ}}(p) = 1/U_0 P \quad (6)$$

Выходная координата контура – угол Ψ .

Передаточная функция контура управления

$$\Phi_{\Psi}(p) = K_{\text{рз}} \gamma_{\text{кт}} K_{\text{рз}}(p) / U_0 p / 1 + K_{\text{рз}} \gamma_{\text{кт}} K_{\text{рз}}(p) / U_0 p \quad (7)$$

Эффективная полоса пропускания контура управления

$$\Delta F_{\text{э}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi(j\omega)_{\Psi}|^2 d\omega \quad (8)$$

3. Ошибки управления

Для системы управления в радиозоне рассматриваются две группы ошибок - аппаратные и шумовые. Для системы управления, построенной на основе информационного параметра m_a , обе группы ошибок связаны с анализом работы фазового детектора.

Если уровень шумов невелик, то влияние шума будет сказываться

в основном на канале сигнала ошибки, приводя к появлению в контуре управления (рис. 6) помехи на выходе безынерционной части контура со спектральной плотностью

$$G_{ш}(0) = 4 G_{швх} (K_{со} K_{Д})^2, \quad (9)$$

где $G_{швх}$ - спектральная плотность шумов на входе приемника.

Средняя квадратическая ошибка управления, обусловленная шумами,

$$\delta_{\psi/ш} = \sqrt{G_{ш} \Delta F_э} / K_{РЗ} \gamma_{km}. \quad (10)$$

Заметив, что $K_{РЗ} = m_A / \psi = 1 / \psi_{\max}$, и используя зависимости (5) и (9), преобразуем (10) к виду

$$\delta_{\psi/ш} = 2 r_{\max} \psi_{\max} / U_{то} \sqrt{2 \pi G_{швх} \Delta F_э / P_{пер} D_{пер} S_{анр} R_{вх}}. \quad (11)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

В системе MICRO – CAP 5 создан файл RADZON5.CIR, содержащий схему, имитирующую работу системы радиоуправления в радиозоне. Структурная схема имитатора приведена на рис. 7. На схеме приняты следующие обозначения: COMMAND – датчик напряжения U_{ψ} , пропорционального угловому отклонению ЛА от радиозоны, NF – генераторы поднесущих частот, ПО – потенциометр отклонения (устройство, имитирующее угловое отклонение ЛА от радиозоны), К – коммутатор, ш – генератор белого шума, ПД – потенциометр дальности (устройство, имитирующее удаление ЛА от ПУ), $\hat{A}$ – сумматоры, ФП1, ФП2 – фильтры поднесущих частот, Д – детекторы поднесущих частот, Т – триггер, ФСО – фильтр сигнала ошибки, УСО – усилитель сигнала ошибки, ФД – фазовый детектор, ФКС – фильтр командного сигнала.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запустить систему MICRO – CAP 5 и вызвать файл RADZON5.CIR.
2. Провести временной анализ устройства:
 - войти в меню ANALYSIS и выбрать функцию TRANSIENT ANALYSIS;
 - в колонке Р набрать номера графиков;

- в колонке Yexpression набрать имена контрольных точек схемы, сигналы которых требуется посмотреть [например, V(1)]; в передатчике исследуются точки 2, 5, 6, 8, 9, 10; в приемнике – 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21;
- в колонке Hexpression установить t (т.е. исследование временных зависимостей);
- в колонке XRange установить требуемое время анализа (например, 0.0005, 0);

в колонке YRange установить предполагаемый размах значений напряжения в исследуемой точке (если размах неизвестен, то поставить значения $-10, 10$, а также метку против строки Auto Scale Ranges);

- нажать кнопку RUN в меню анализа;

для изменения условий анализа войти в меню TRANSIENT, включить режим Limits и изменить значения временных параметров или имена контрольных точек.

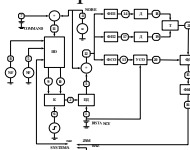


Рис. 7. Структурная схема имитатора системы управления в радиозоне

Чтобы вернуться к схеме, необходимо закрыть окно TRANSIENT ANALYSIS с помощью кнопки .

3. Снять зависимость командного напряжения $U_{к\psi/p}$ [точка (16)] от углового отклонения U_{ψ} [напряжение в точке V(7)] ЛА разомкнутой системы управления при минимальном $\Gamma_{\min}$ и максимальном $\Gamma_{\max}$ удалениях ЛА от пункта управления, для чего:

- двойным нажатием левой клавиши мыши на слове Distancy войти в режим редактирования;
- в графе Value набрать «1» (что соответствует минимальному удалению ЛА от ПУ) и нажать Enter;
- войти в меню ANALYSIS и выбрать функцию TRANSIENT ANALYSIS;
- в двух строках колонки P установить «1»;
- в соответствующих графах Yexpression - V(7) и V(16);
- в колонке XRange установить время анализа 0.0005, 0;
- поставить метку против строки Auto Scale Ranges;
- нажать кнопку Stepping;
- в графе Step What набрать V7 (если в графе уже набрано слово COMMAND, то ничего не менять);
- в графе From набрать «-4»;
- в графе To набрать «4»;
- в графе Step Value набрать «2.0»;
- в графе Status поставить метку против строки On; нажать OK;
- нажать кнопку ►;
- значения напряжения для построения графика $U_{к\psi/p}=f(U_{\psi})$ снимать при $t=500\mu$;
- по методике, описанной выше, изменить значение параметра Distancy на «2» и снять зависимость $U_{к\psi/p}=f(U_{\psi})$ для максимального отклонения ЛА от ПУ.

Результаты измерения занести в табл. 1

4. Замкнуть систему, для чего:

- двойным нажатием левой клавиши мыши на слове «gaz» (над словом SYSTEMA) войти в режим редактирования;
- в графе Value набрать «zam» и нажать Enter.

5. Снять зависимость $U_{к\psi/3}=f(U_{\psi})$ по методике, изложенной в п. 3 (при замкнутой системе командному напряжению $U_{к\psi/3}$ соответствует точка 12). Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 1

U_{ψ} , В	$\Gamma_{\min}$	$\Gamma_{\max}$
	$U_{к\psi/p}$, В	

Таблица 2

U_{ψ} , В	$\Gamma_{\min}$	$\Gamma_{\max}$
	$U_{к\psi/3}$, В	

--	--	--

--	--	--

6. Построить графики зависимости $U_{кш/р}=f(U_{\psi})$, $U_{кш/з}=f(U_{\psi})$.

7. Разомкнуть систему, для чего:

- двойным нажатием левой клавиши мыши на слове «zam» (над словом SYSTEMA) войти в режим редактирования ;
- в графе Value набрать «gaz» и нажать Enter.

8. Снять зависимость командного напряжения $U_{кш/р}$ [точка (16)] от углового отклонения U_{ψ} [напряжение в точке V(7)] ЛА разомкнутой системы управления при минимальном $r_{\min}$ удалении ЛА от пункта управления в условиях действия аддитивных шумов для трех значений уровня шума, для чего:

- установить стрелку на сумматор (между точками 3 и 12), имитирующий влияние аддитивных шумов;
- двойным нажатием левой клавиши мыши войти в режим редактирования;
- в графе Value набрать SUM (1,4) [для второй и третьей характеристик SUM (1,5) и SUM (1,6)] и нажать Enter;
- снять зависимость $U_{кш/р}=f(U_{\psi})$ по методике, изложенной в п. 3;
- результаты измерения занести в табл. 3.

Таблица 3

$U_{\text{ш}}$	4	5	6
$U_{\psi}, \text{В}$	$U_{кш/р}, \text{В}$		

9. Построить зависимости $U_{кш/р}=f(U_{\psi})$ / $U_{\text{ш}}=\text{const}$.

10. Оценить систематическую ошибку управления, обусловленную шумами (рис. 8). Относительный уровень систематической шумовой ошибки определяется отношением

$$\beta_{\text{вст}} = \Delta U_{\psi \text{ст}} / U_{\psi \text{max}}.$$

Результаты по оценке $\beta_{\text{вст}}$ свести в табл. 4. Объяснить причины возникновения систематической шумовой ошибки.

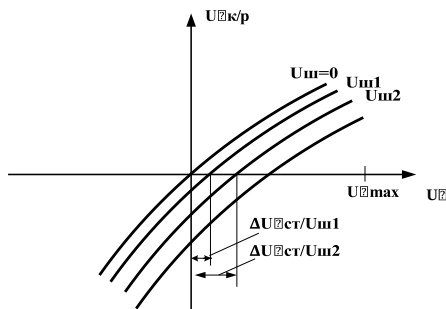


Рис. 8. Оценка систематической шумовой ошибки управления

Таблица 4

$U_{ш}$	4	5	6
$\beta_{уст}$			

11. Снять зависимость командного напряжения $U_{кш/р}$ [точка (16)] от углового отклонения U_{ψ} [напряжение в точке V(7)] ЛА разомкнутой системы управления при минимальном r_{min} удалении ЛА от пункта управления в условиях действия мультипликативных шумов для трех значений уровня шума, для чего:

- установить нулевой уровень аддитивных шумов (в графе Value набрать SUM (1,0));
- установить стрелку на сумматор (над ПО), имитирующий влияние мультипликативных шумов;
- двойным нажатием левой клавиши мыши войти в режим редактирования;
- в графе Value набрать SUM (1,4) [для второй и третьей характеристик SUM (1,5) и SUM (1,6)] и нажать Enter;
- снять зависимость $U_{кш/р}=f(U_{\psi})$ по методике, изложенной в п. 3;
- построить зависимости $U_{кш/р}=f(U_{\psi})/ U_{ш}=const$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принципы действия системы управления в радиозоне.
2. Структурная схема аппаратуры пункта управления.
3. Структурная схема аппаратуры ЛА при информационном параметре m_a .
4. Структурная схема аппаратуры ЛА при информационном параметре m_r .
5. Структура линеаризованного замкнутого контура и передаточные функции его звеньев.
6. Что такое эквивалентная полоса пропускания контура управления? Для чего она используется? Как определить эквивалентную полосу?
7. Как оценить влияние шума на точность управления?
8. Как влияет шум на структуру радиозвена контура управления?
9. Как устанавливается структура радиозвена при учете влияния

шумов по каналу сигнала ошибки и по каналу опорного сигнала?

10. Почему из-за шумов возникает систематическая ошибка управления?

11. Как оценить величину систематической ошибки управления, обусловленной шумами?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вейцель В.А., Типугин В.Н. Радиоуправление. М.: Сов. радио, 1973.
2. Моргунов .А. Н. Системы радиотеленавещения. Рязань: РРТИ, 1978.
3. Щукин А.Н. Динамические и флуктуационные ошибки управляемых объектов. М.: Сов. радио, 1961.
УДК 621.396

Система управления в радиозоне: методические указания к лабораторной работе №5/ Рязан.гос.радиотехн.ун-т; сост.: В.С.Паршин, М.В.Кулакова. Рязань, 2015. 12 с.

Изложены особенности системы управления в радиозоне.

Предназначены для студентов 5-го курса специальности 11.05.01 и бакалавров направления 11.03.01 ФРТ.

Табл. 4. Ил. 8. Библиогр.: 3 назв.

Радиоуправление, равносигнальная зона, радиозона, контур управления, частота манипуляции, диаграмма направленности

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиоуправления и связи Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой С.Н.Кириллов)

Составители: П а р ш и н Валерий Степанович
К у л а к о в а Марина Васильевна

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 10.04.15 г. Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

4905

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ В РАДИОЗОНЕ

Методические указания к лабораторной работе № 5

Рязань 2015

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение структуры сигнала КИМ-ОФМн-ФМ.
2. Изучение принципов построения радиолинии КИМ-ОФМн-ФМ.
3. Изучение влияния шума на работу радиолинии.
4. Анализ влияния фазовых флуктуаций колебаний местного тактового генератора системы синхронизации на работу радиолинии.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Сигналы со сложными видами модуляции

Современные системы связи с подвижными объектами являются совмещенными, т.е. представляют собой комплексы, решающие задачи радиоуправления, связи, телеметрии, измерения параметров движения. Требования, предъявляемые к помехоустойчивости, надежности, долговечности таких систем, весьма высоки, и они обеспечиваются применением цифровой техники.

При создании современных систем передачи используются как сложные сигналы (например, шумоподобные), так и сигналы с многоступенчатой модуляцией. На первой ступени используется, как правило, кодово-импульсная модуляция (КИМ), на последующих - амплитудная модуляция (АМ), частотная (ЧМ), частотно-импульсная (ЧИМ), фазовая (ФМ), относительная фазовая (ОФМн). Наиболее часто встречаются сочетания КИМ-ЧМн-ФМ, КИМ-ЧИМ-ФМ, КИМ-АМ-ФМ, Ким-ФМ-ФМ, КИМ-ОФМн-ФМ [1, 2, 3].

Характер спектра сигнала с многоступенчатой модуляцией в значительной степени определяется спектром сигнала КИМ. С учетом

того, что длительность элементарного символа τ_0 равна периоду их повторения, символ «1» передается импульсом с амплитудой a , символ «0» - нулевым уровнем, отдельные разряды независимы, символы «1» и «0» передаются с вероятностями P_1 и P_0 соответственно, энергетический спектр сигнала с КИМ запишется следующим образом [1]:

$$G_{\text{КИМ}} = a^2 P_1 (1 - P_1) \tau_0 \left(\frac{\sin \omega \tau / 2}{\omega_0 \tau_0 / 2} \right)^2. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что спектр сигнала КИМ при сделанных предположениях о характере сигнала совпадает со спектром одиночного импульса длительностью τ_0 .

В том случае, когда в сигнале КИМ символ «0» передается отрицательным импульсом с амплитудой a , а вероятность $P_1 = P_0$, вид энергетического спектра будет также с точностью до коэффициента пропорциональности совпадать со спектром одиночного импульса. В то же время необходимо иметь в виду, что в зависимости от свойств сигнала КИМ форма его спектра может изменяться.

При формировании сигнала с трехступенчатой модуляцией сигналом КИМ модулируется по фазе или частоте поднесущее колебание, которым, в свою очередь, по амплитуде, фазе или частоте модулируется несущее колебание.

На рис. 1 изображен спектр сигнала КИМ-ФМ-ФМ.

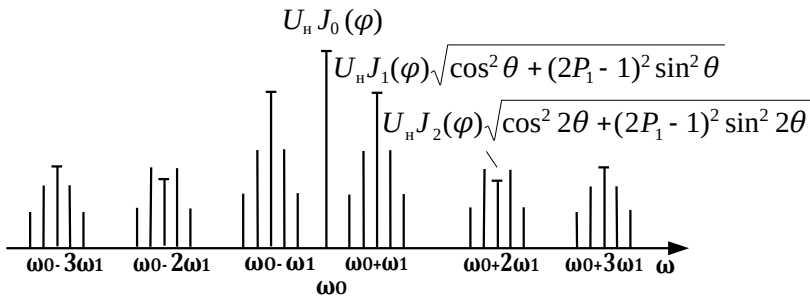


Рис. 1. Спектр сигнала КИМ-ФМ-ФМ

Параметрами модуляции является девиация фазы θ и φ соответственно на первой и второй ступенях модуляции. В спектре сигнала КИМ-ФМ-ФМ вблизи несущей нет модулирующих компонент.

Детектируя сигнал КИМ-ФМ-ФМ с помощью ФД, на его выходе получаем модулированные по фазе четные гармоники поднесущей частоты при опорном напряжении, синфазном с несущей. Если опорное напряжение сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно несущей, на выходе ФД будем иметь модулированные по фазе нечетные гармоники поднесущей. Сигнал КИМ выделяется после второй ступени модуляции также с помощью ФД.

Спектр сигнала КИМ-ОФМн-ФМ подобен спектру сигнала КИМ-ФМ-ФМ при девиации фазы $\theta = 180^\circ$.

2. Прием простых фазоманипулированных сигналов

Применение фазоманипулированных сигналов с манипуляцией фазы на u позволяет передавать цифровую информацию с требуемой достоверностью при меньших затратах полосы и энергии по сравнению с другими двоичными сигналами [3].

При фазовой манипуляции информация о передаваемой цифровой последовательности заложена в фазе сигнала, которая на интервале времени τ_0 может принимать значения 0 или u :

$$S(t) = S_0 \sin(\omega_0 t + \phi_x),$$

где фаза

$$\phi_x = \begin{cases} \phi_1 = 0 & (\text{передается символ } 1); \\ \phi_2 = \pi & (\text{передается символ } 0); \end{cases}$$

При передаче двоичной цифровой последовательности фаза ϕ_x является случайной величиной, однозначно связанной со случайной последовательностью передаваемых символов.

Демодуляция фазоманипулированных сигналов производится с помощью фазовых детекторов (рис. 2).

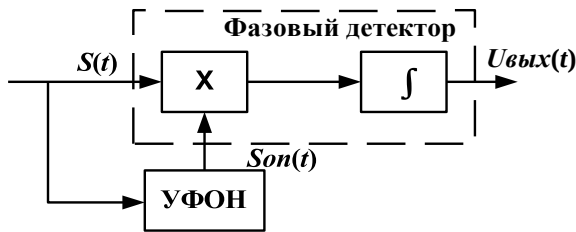


Рис. 2. Структурная схема фазового детектора: X - перемножитель; ∫ - интегратор (ФНЧ); УФОН - устройство формирования опорного напряжения

Фазовый детектор осуществляет перемножение колебания, поступающего на его вход, на опорное напряжение. С помощью интегратора или ФНЧ происходит фильтрация входного напряжения от высокочастотных составляющих. Напряжение на выходе ФД с учетом фильтрации высокочастотных составляющих:

$$U_{\text{вых}}(t) = K_{\text{ФД}} (S_0 S_{\text{оп}0} / 2) \cos [(\omega_0 - \omega_{\text{оп}}) t + (\phi_x - \phi_{\text{оп}})]$$

где $K_{\text{ФД}}$ - коэффициент передачи фазового детектора; опорное напряжение $S_{\text{оп}}(t) = S_{\text{оп}0} \sin [(\omega_{\text{оп}} t + \phi_{\text{оп}})]$.

Положим, что фаза опорного колебания $\phi_{\text{оп}} = 0$. Тогда при выполнении условия $\omega_0 = \omega_{\text{оп}}$ при передаче символа «1» на выходе ФД напряжение

$$U_{\text{вых}}(t) = K_{\text{ФД}} S_0 S_{\text{оп}0} / 2,$$

а при передаче символа «0»

$$U_{\text{вых}}(t) = -K_{\text{ФД}} S_0 S_{\text{оп}0} / 2,$$

т.е. для нормальной работы фазового детектора опорное напряжение должно быть синхронным с сигналом. ФД, опорное напряжение которого удовлетворяет такому условию, часто называют синхронным или когерентным.

Если начальная фаза $\phi_{\text{оп}}$ изменит свое значение на $\pm\pi$, то полярность выходного напряжения фазового детектора изменится на противоположную. Это явление называется обратной работой фазового детектора. Такой режим работы ФД недопустим, так как момент перескока фазы $\phi_{\text{оп}}$ неизвестен. Основная трудность реализации демодулятора противофазных ФМн сигналов состоит в создании синхронного опорного напряжения, имеющего неизменную начальную фазу.

Предложено [3] несколько схем, позволяющих формировать опорное напряжение (например, схема Костаса и Сифорова). Эти схемы позволяют уменьшить вероятность перескока фазы, но полностью устранить «обратную» работу детектора не могут.

3. Передача цифровой информации с помощью относительной фазовой манипуляции (ОФМн)

Для устранения «обратной» работы ФД предложено ввести относительную систему отсчета фазы. Фаза сигнала с выхода фазового манипулятора будет определяться значениями предыдущего и передаваемого символов.

Правило манипуляции несущего (или поднесущего) колебания определяется следующим образом: при передаче символа «1» фаза

сигнала остается без изменения, а при передаче символа «0» фаза сигнала с выхода манипулятора изменяется на 180° , т.е. при передаче методом ОФМн одно и то же значение информационного символа может быть передано двумя сигналами с выхода манипулятора с фазами, отличающимися друг от друга на 180° . Фаза сигнала будет определяться фазой предыдущего сигнала. В передающем устройстве системы с ОФМн необходимо перед началом каждого сеанса связи передавать вспомогательный сигнал, от фазы которого и начинается отсчет фазы.

4. Когерентный метод приема сигналов с ОФМн

Такой метод приема производится в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.

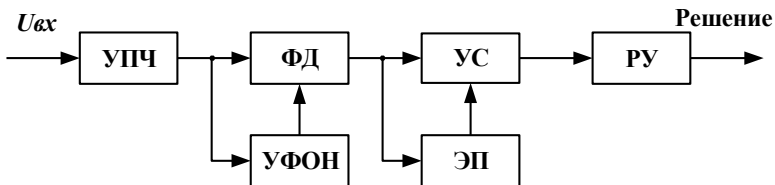


Рис. 3. Когерентный приемник сигналов с ОФМн: УПЧ – усилитель промежуточной частоты; ФД - фазовый детектор; УФОН - устройство формирования опорного напряжения; УС - устройство сравнения; ЭП - элемент памяти; РУ - решающее устройство

Решение о том, какой символ передан, принимается при сравнении полярности огибающей принятой посылки с полярностью предыдущей. Для сравнения полярностей в приемнике предусмотрен элемент памяти, который запоминает полярность предыдущей посылки.

Особенности когерентного приема сигналов с ОФМн поясняются с помощью табл. 1.

В этой таблице обозначено: X_j – вид символа (0 или 1); S_j – посылка сигнала; U_j – напряжение на выходе фазового детектора; $X_j^{\wedge}$ – принятый символ. В первом столбце таблицы приведены вспомогательные символы и посылки, предшествующие началу

передачи информационной последовательности символов. Посылки сигналов $S_{j\text{ОФМн}}$ образованы в соответствии с правилом получения ОФМн сигналов.

Таблица 1

№ столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X_j	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
$S_{j\text{ОФМн}}$	S_1	S_2	S	S	S	S	S	S	S	S_1	S_2	S_1	S_1
S_{on}	S_1	S_1	S	S	S	S	S	S	S	S_2	S_2	S_2	S_2
Полярность U_i	+	-	-	+	-	-	$\pm$	-	+	-	$\pm$	-	-
Полярность U_{j-1}		+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	$\pm$	-
X_j	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

Перескок фазы опорного напряжения при приеме ОФМн сигналов приводит к появлению только локальных ошибок. Если скачок фазы произойдет точно на границе соседних посылок S_{j-1} и S_j , то неправильно будет принят только символ X_j . В табл. 1 показано, что в момент, соответствующий границе между 5 и 6 посылками, произошел скачок опорного напряжения и его фаза стала соответствовать фазе посылок S_2 (вместо фазы посылки S_1). В рассматриваемом случае произошла однократная ошибка. При классической ФМн фазовый детектор перешел бы в «обратный» режим работы.

Если скачок фазы опорного напряжения произойдет в момент, находящийся в пределах длительности посылки сигнала, то импульс на выходе ФД «разобьется» на две части с разной полярностью. В

результате такого дробления импульса возможен ошибочный прием двух соседних символов.

При приеме двух ОФМн сигналов неизбежны такие ошибки, вызванные непосредственным воздействием шумов на передаваемые посылки. Если под воздействием шумов фаза посылки сигнала изменится настолько, что это приведет к изменению полярности напряжения на выходе ФД, то ошибочно будет принят не только переданный символ, но и следующий за ним. В табл. 1 это иллюстрируется десятым столбцом. Если под действием помехи фаза посылки S_1 изменится так, что будет воспринята как фаза посылки S_2 , то это приведет к изменению полярности U_j и ошибочному приему символов с номерами 10 и 11.

Необходимо отметить, что из-за влияния шумов опорное напряжение, формируемое в схеме, не полностью когерентно с принимаемым сигналом. Поэтому такой метод приема часто называют частично когерентным.

5. Некогерентный метод приема сигналов с ОФМн

Схема некогерентного приемника сигналов с ОФМ изображена на рис. 4.

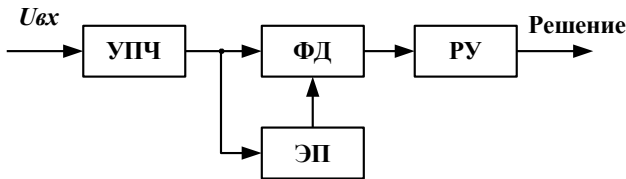


Рис. 4. Схема некогерентного приемника сигналов с ОФМн: УПЧ - усилитель промежуточной частоты; ФД - фазовый детектор; ЭП - элемент памяти; РУ - решающее устройство

Этот метод отличается тем, что в качестве опорного напряжения используется предыдущая посылка, которая запоминается на время τ_0 , т.е. на время длительности элементарного символа. В фазовом детекторе происходит сравнение фазы принятой посылки с фазой предыдущей. Особенности приема ОФМн сигналов некогерентным методом поясняются табл. 2. В табл. 2 приняты те же обозначения, что

и в табл. 1. Так как непосредственно опорное напряжение не формируется, обратная работа ФД принципиально исключена.

Под воздействием помех фаза сигналов может изменяться так, что на выходе ФД полярность напряжения изменится на противоположную. Это приведет к появлению ошибочного символа на выходе решающего устройства. Так как каждая посылка участвует в формировании выходного напряжения два раза (первый раз как сигнал с фазовой манипуляцией, второй - как опорный сигнал), то ошибки на выходе, как правило, появляются парами.

Таблица 2

№ столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X_j	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
$S_{j\text{ОФМн}}$	S_1	S_2	S	S	S	S	S	S	S	S_1	S_1	S_1	S_2
$S_{on} = S_{j-1}$		S_1	S	S	S	S	S	S	S	S_2	S_1	S_1	S_1
Полярность U_j		-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+
$\hat{X}_j$		0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1

Вероятность ошибки при приеме сигналов на фоне белого шума определяется следующей формулой:

$$P = 0,5 \exp(-E/N_0),$$

где E - энергия сигнала; N_0 - спектральная плотность шума.

Сравнение когерентного и некогерентного методов приема ОФМн сигналов показывает, что при отношении сигнал/шум больше чем 3-4 разница весьма мала.

Основное различие между когерентным и некогерентным методами определяется не помехоустойчивостью, а той скоростью передачи, которая может быть достигнута. Выше она у когерентного метода приема, который применяется более часто там, где требуется повышенная скорость передачи.

6. Структурная схема радиолинии КИМ-ОФМн-ФМ

Рассмотрим работу одной из возможных схем, использующих для передачи цифровых сообщений ОФМн. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы, показаны на рис. 6. Передающая часть радиолинии (рис. 5) работает следующим образом.

Передаваемые аналоговые сигналы, снимаемые с датчиков через коммутатор, подаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), в котором они преобразуются в цифровой код. Каждому аналоговому сообщению соответствует свое кодовое слово (кодограмма). Все кодовые слова имеют одинаковую разрядность. С помощью преобразователя кода параллельный код с выхода АЦП преобразуется в последовательный двоичный код.

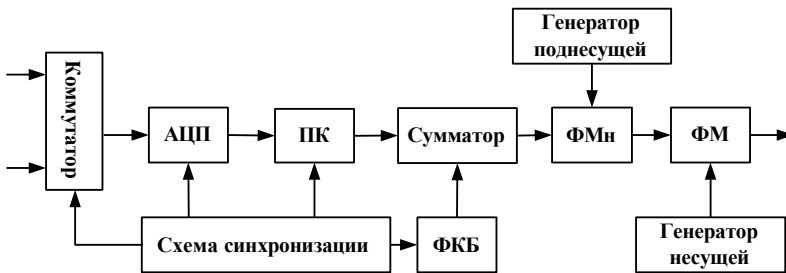


Рис. 5. Структурная схема передающей части радиолинии КИМ-ОФМн-ФМ: АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ПК - преобразователь кода; ФКБ - формирователь кода Баркера; ФМн - фазовый манипулятор; ФМ - фазовый модулятор

Кодовые слова от всех источников сообщений (от всех датчиков) образуют кадр. Для определения в приемнике начала кадра в него вводится синхронизирующий сигнал или синхрослово. В изучаемой радиолинии в качестве синхрослова выбран код Баркера, разрядность которого может меняться. Объединение синхрослова и кодовых слов происходит в сумматоре. Последовательность двоичных символов с выхода сумматора, образующих кадр, поступает на фазовый манипулятор, с помощью которого происходит манипуляция на 180^0 фазы поднесущего колебания. Манипуляция фазы происходит по правилу: при передаче символа «1» фаза колебаний остается той же, что и у предыдущей посылки, при передаче «0» фаза колебаний меняется на 180^0 .

Часто в начале сеанса связи передается один вспомогательный символ для определения фазы первого информационного символа.

Сформированным фазоманипулированным сигналом
осуществляется фазовая модуляция несущего колебания. Для
обеспечения воз-

возможности построения совмещенных радиолиний девиация фазы при модуляции несущей составляет величину, не превышающую 120° . При этом в спектре излучаемого колебания имеется спектральная составляющая на частоте несущего колебания.

С помощью системы синхронизации [4] происходит управление работой передающей части радиолинии. Подключение аналоговых сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$ к АЦП происходит с периодом, который определяется частотными свойствами U_1 и U_2 . Система синхронизации управляет также работой преобразователя кода и вырабатывает запускающий импульс, по которому в формирователе кода Баркера формируется синхрослово. Сигнал ОФМ с выхода фазового манипулятора приведен на рис. 6, б, цифровое сообщение, соответствующее фазоманипулированному сигналу, - на рис. 6, а.

На выходе ФД высокочастотной части приемника (рис. 7) формируется фазоманипулированный сигнал на поднесущей частоте $f_{под}$, т.е. сигнал с ОФМ.

Управляет работой приемной части радиолинии система посимвольной синхронизации. Ее назначение - вырабатывать периодическую последовательность импульсов (меандр тактовой синхронизации) с тактовой частотой f_m . Передний и задний фронты каждого синхронизирующего импульса должны совпадать с началом и концом каждого элементарного символа в сигнале ОФМн. Работает система посимвольной синхронизации следующим образом. Фазоманипулированный сигнал на поднесущей частоте подается на фазовый детектор

ФД1 и на устройство формирования опорного напряжения УФОН. С выхода УФОН снимается синусоидальное напряжение на частоте $f_{под}$, но уже без фазовой манипуляции.

На выходе фазового детектора ФД1 формируется последовательность импульсов, фронты которых жестко привязаны к моментам времени перескока фазы сигнала ОФМ (рис. 6, в). В том случае, когда сигнал с КИМ состоит из одних символов «0», с выхода ФД1 будет сниматься меандр.

Для слежения за тактовой частотой используется система ФАП. Сигнал с выхода фазового детектора ФД2 является синхронизирующим для местного тактового генератора МТГ, который вырабатывает меандр (рис. 6, г) тактовой синхронизации с

периодом $2\tau_0$ (τ_0 – длительность элементарного символа). Управляющим сигналом для МТГ является сигнал с выхода ФД2.

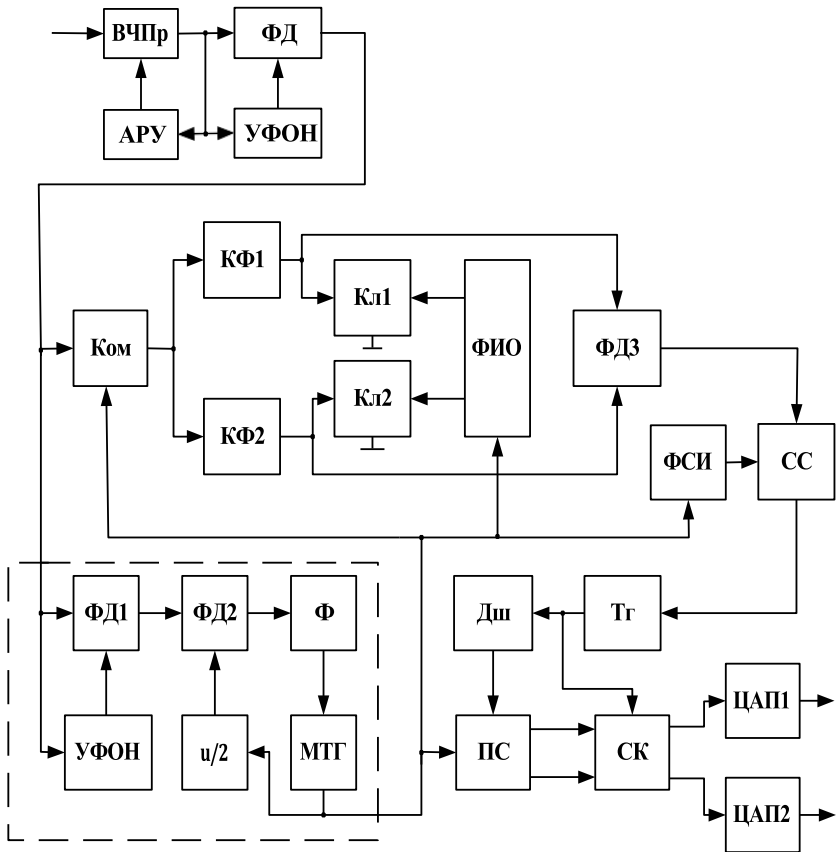


Рис. 7. Структурная схема приемной части радиолинии КИМ-ОФМн-ФМ: УФОН - устройство формирования опорного напряжения; ВЧПр - высокочастотная часть приемника; АРУ - автоматическая регулировка усиления; ФД - фазовый детектор; Ком - коммутатор; КФ - коммутируемый фильтр; Кл - ключ; ФИО - формирователь импульсов обнуления; СС - схема стробирования; ФСИ - формирователь стробирующих импульсов; Дш - дешифратор; Тг - триггер; ПС - пересчетная схема; СК - селектор каналов; ЦАП - цифроаналоговый преобразователь; $u/2$ - фазовращатель; Ф - фильтр; МТГ - местный тактовый генератор

С учетом фазовращателя на $\pi/2$ дискриминаторная характеристика фазового детектора ФД2 будет иметь (при разомкнутой петле обратной связи) изображенный на рис. 8 вид.

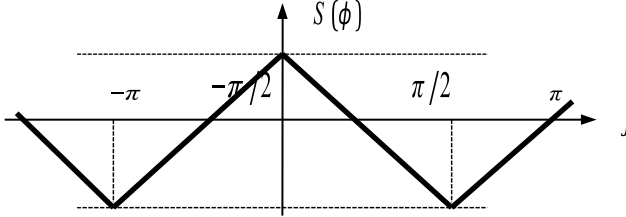


Рис.8. Дискриминаторная характеристика

В установившемся режиме сигнал на выходе МТГ синфазен с фазоманипулированным сигналом.

Для демодуляции сигналов с ОФМ используется некогерентный метод приема. Основными элементами демодулятора являются высокочастотные полосовые коммутируемые фильтры, настроенные на частоту f_{mod} . В момент, соответствующий приходу очередного символа КИМ-ОФМ S_j , коммутатор, управляемый

сигналом с выхода МТГ, подключает его на время τ_0 к фильтру КФ1. Непосредственно перед этим в КФ1 устанавливаются нулевые начальные условия. Для этого КФ1 через ключ 1 (Кл1) на короткое время подключается к точке нулевого потенциала схемы (к «земле»).

Управляющие импульсы, которые обнуляют фильтры с помощью ключей 1 и 2 (Кл1 и Кл2), формируются формирователем импульсов обнуления ФИО (рис. 6, д, е). После окончания символа КИМ-ОФМ на

время τ_0 в КФ1 сохраняются колебания (рис. 6, ж) с фазой

посылки S_j . Эти колебания поступают на фазовый детектор и

выполняют роль опорного колебания для очередного символа S_j

сигнала КИМ-ОФМ. В момент прихода символа S_{j+1} с помощью коммутатора ко входу ФД3 подключается КФ2, в котором

возбуждаются колебания с фазой, соответствующей посылке S_{j+1}

(рис. 6, з). Перед запоминанием посылки S_{j+1} в КФ2 с помощью импульсов, снимаемых с выхода ФИО, устанавливаются нулевые начальные условия. Нетрудно видеть, что КФ1 и КФ2 возбуждаются символами сигнала КИМ-ОФМ поочередно: четные символы возбуждают один фильтр, нечетные – другой. Таким образом, на КФ1 и КФ2 формируются колебания, имеющие от момента возбуждения до момента срыва длительность $2\tau_0$. Фаза колебаний в каждом фильтре соответствует фазе символов S_j и S_{j+1} в сигнале ОФМ.

Формирователь стробирующих импульсов ФСИ вырабатывает последовательность импульсов (рис. 6, к), совпадающих по времени с задним фронтом информационных символов. С выхода схемы стробирования СС (рис. 6, л) снимаются импульсы, полярность которых определяется полярностью сигналов с выхода ФДЗ (рис. 6, и). С выхода триггера Тг снимается последовательность элементарных символов, состоящая из синхрослова и командных слов (рис. 6, м).

На рис. 6, н приведена в более крупном масштабе последовательность, состоящая из синхрослов и командных слов. В момент, соответствующий окончанию синхрослова (кода Баркера), с выхода дешифратора Дш снимается импульс (рис. 6, о), который обнуляет пересчетную схему ПС. На селектор каналов СК подается нулевой потенциал, и первое командное слово проходит на первый цифроаналоговый преобразователь ЦАП1. При заполнении ПС, счетчики которой подсчитывают число импульсов, поступающих с МТГ, на СК выдается потенциал, соответствующий «1», и СК подключает триггер к ЦАП2. Следовательно, в рассматриваемом варианте приемного устройства используется безынерционная система пословной синхронизации.

При работе приемника в реальных условиях прием сигнала КИМ-ОФМ будет происходить на фоне шума, что приведет к ошибкам: вместо символа «1» будет регистрироваться «0» и наоборот. Основные причины этого следующие.

1. На выходе КФ1 и КФ2 будут не только «сигнальные» составляющие, обусловленные воздействием фазоманипулированного сигнала, но и колебания, вызванные воздействием шума. Поэтому на выходе схемы стробирования при равенстве фаз символов S_j и S_{j+1} может с некоторой вероятностью формироваться

отрицательный импульс, а при неравенстве фаз этих символов – положительный.

2. Из-за влияния шума фаза местного генератора будет флюктуировать около своего среднего значения. Это приведет к флюктуациям момента переключения коммутатора, ключей, формирователя импульсов обнуления и сброса. Также из-за влияния шума может нарушаться работа покадровой синхронизации.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

С разрешения преподавателя или инженера включите ПЭВМ. После загрузки системы ознакомьтесь с порядком выполнения работы, выведенным на монитор.

1. Введите «1» (номер выполняемого пункта). Задайте уровни командного напряжения каналов курса (контрольная точка 1) и тангажа (контрольная точка 2) в пределах от 0 до 2,55 В (дробные значения вводите через точку). Зарисуйте осциллограммы во всех характерных точках передатчика, соблюдая очередность контрольных точек. Аналогично исследуйте работу приемника.

2. Введите «2». Зарисуйте осциллограммы на выходе ФДЗ при различном отношении сигнал/шум Q на выходе ВЧ части приемника ($Q = 0,5; 1; 5; 10$) при идеально работающей системе синхронизации.

3. Введите «3». Определите вероятности искажения кодовых слов при разных отношениях сигнал/шум Q . Оценка вероятности искажения определяется как

$$p = n_1 / n_0,$$

где n_1 - число искаженных символов; n_0 - число передаваемых символов. Результаты измерений запишите в табл. 3. Выполните данный пункт несколько раз и вычислите среднее значение вероятности искажения P_{cp} . Постройте зависимость P_{cp} от отношения сигнал/шум Q .

Таблица 3

q	2,5	1	0,5
p ₁			
p ₂			

...			
P_n			
P_{cp}			

4. Введите «4». Исследуйте влияние системы синхронизации: снимите зависимость вероятности искажения кодовых слов от флюктуации фронта меандра тактовой синхронизации при различном временном положении стробирующих импульсов t' (при различной задержке стробирующего импульса от заднего фронта меандра).

Результаты измерений запишите в табл. 4. Постройте график зависимости P от $t'/t_{имп}$ при разных значениях σ , где t' – местоположение стробирующего импульса относительно $t_{имп}$ ($t_{имп}$ – длительность импульса на выходе ФДЗ), σ – дисперсия флюктуаций фронта меандра местного генератора.

Таблица 4

σ	1			3			5		
$t'/t_{имп}$	1	0,9	0,8	1	0,9	0,8	1	0,9	0,8
P									

5. Исследуйте работу устройства декодирования кадрового синхрослова: посмотрите и зарисуйте сигналы на выходе устройства декодирования при использовании семи- и тринадцатиразрядного кода Баркера.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Спектры сигналов с многоступенчатыми видами модуляции. Возможности построения совмещенных радиопередающих линий.
2. Формирование опорного напряжения для синхронного детектирования. Обратная работа фазового детектора.
3. Когерентный и некогерентный методы приема сигналов с ОФМ.
4. Работа системы синхронизации радиопередающей линии КИМ-ОФМн-ФМ.
5. Техническая реализация некогерентного метода приема сигналов с ОФМ.
6. Работа передающей и приемной частей радиопередающей линии.
7. Свойства кода Баркера.
8. Требования к работе системы синхронизации.
9. Назначение послесловной, покадровой и посимвольной синхронизаций.
10. Сравнение инерционной и безынерционной систем синхронизаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перов А.И. Радиоавтоматика: учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2014. – 320 с.
2. Основы радиоуправления: учеб. пособие для вузов/ Под ред. В.А. Вейцеля. – М.: Дрофа, 2005. – 416 с.
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2015. – 320 с.
4. Пенин П.И. Системы передачи цифровой информации. – М.: Сов. радио, 1976. – 346 с.

УДК 621.396

Система передачи цифровой информации КИМ-ОФМн-ФМ: методические указания к лабораторной работе № 7/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: В.С.Паршин, М.В.Кулакова. Рязань, 2018. 16 с.

Изложены особенности передачи и приема цифровых сигналов с относительной фазовой манипуляцией.

Предназначены для студентов 4-го курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» факультета радиотехники и телекоммуникаций.

Табл. 4. Ил. 8. Библиогр.: 4 назв.

Спектр сигнала, модуляция, радиолиния, синхронизация

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиоуправления и связи Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой, проф. С.Н. Кириллов)

Система передачи цифровой информации КИМ-ОФМн-ФМ

Составители: П а р ш и н Валерий Степанович
К у л а к о в а Марина Васильевна

Редактор М.Е. Цветкова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 15.03.18. Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ КИМ-ОФМ_Н-ФМ

Методические указания к лабораторной работе № 7

Рязань 2018

Лабораторная работа № 3

КОМАНДНАЯ РАДИОЛИНИЯ ШИМ-ЧМ-АМ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Изучение командной радиолнии ШИМ-ЧМ-АМ.
2. Оценка аппаратурной точности передачи команд в линии ШИМ-ЧМ-АМ.
3. Исследование воздействия шумов на точность передачи команд в линии ШИМ-ЧМ-АМ

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для командного радиоуправления характерными являются формирование команды управления движением летательного аппарата (ЛА) на пункте управления и передача её на борт ЛА с помощью специальной командной радиолнии.

Чтобы сформировать команду на пункте управления, необходимо иметь на нём данные о параметрах движения цели в ЛА. В зависимости от способа получения этой информации командное радиоуправление (КРУ) разделяется на три вида: КРУ-1, КРУ-2, КРУ-3 [1].

При КРУ-1 движения цели к ЛА измеряются непосредственно на пункте управления с помощью радиовизиров. По данным радиовизиров вычислительное устройство с учетом метода наведения вырабатывает команды управления U_k , передаваемые с помощью командной радиолнии (КРЛ) на борт ЛА. На пункте управления находится передатчик КРЛ, а на борту ЛА - приёмник КРЛ. Выделенная приёмником команда U_k поступает на автопилот, который через органы управления меняет пространственное положение ЛА.

При КРУ -2 радиовизир цели устанавливают не на пункте управления, а на борту ЛА, измеряя положение цели относительно ЛА. Информация об относительном положении цели с борта ЛА с помощью специальной линии связи передается на пункт управления, где вычислительным устройством формируются команды управления, передаваемые на борт ЛА по командной радиолнии так же, как и при КРУ-1. КРУ-2 имеет то преимущество перед КРУ- 1, что может обеспечить управление ЛА при нахождении цели за радиогоризонтом.

Командное радиоуправление третьего вида является частным случаем КРУ-1. его особенность состоит в том, что цель отождествляется с местоположением радиовизира, т.е. осуществляется

наведение «на себя».

1. Принципы действия командной радиолинии ШИМ-ЧМ-АМ

Командная радиолиния ШИМ-ЧМ-АМ использует непрерывный режим излучения и частотное уплотнение каналов при гармонических поднесущих. В этой линии аналоговая команда U_c преобразуется в соотношение временных интервалов T_1 и T_2 , составляющих в сумме период манипуляции $T_{\text{мн}} = T_1 + T_2 = \text{const}$. Это определяет первую ступень модуляции. - ШИМ (рис. 1, а, б). Последовательность символов ШИМ заполняется гармоническими поднесущими F_{n1} на временном интервале T_1 и F_{n2} - на временном интервале T_2 . Тем самым реализуется вторая ступень модуляции - частотная модуляция ЧМ. Наконец, сигналом ШИМ-ЧМ осуществляется амплитудная модуляция несущего колебания (рис. 1, в, г).

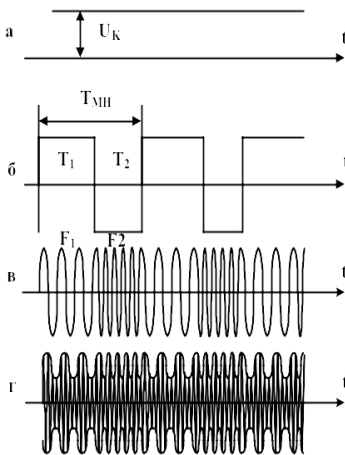


Рис. 1. Формирование сигнала ШИМ-ЧМ-АМ

Перевод командного напряжения и сигнала ШИМ осуществляется с помощью преобразователя, состоящего из генератора пилообразного напряжения ГПН, устройства сравнения, формирующего каскад из генератора тактовых импульсов ГТИ. Генератор пилообразного напряжения и формирующий каскад запускаются тактовыми импульсами, следующими с периодом $T_{\text{мн}}$. На первый вход устройства сравнения подаётся командное напряжение, а на второй — пилообразное напряжение. Как только пилообразное напряжение достигает уровня командного, срабатывает уст-

ройство сравнения, выдавая импульс, останавливающий формирующий каскад. Структурная схема преобразователя ШИМ и временные диаграммы его работы показаны на рис. 2. Практическая реализация преобразователя ШИМ может предусматривать совмещение генератора пилообразного напряжения, устройства сравнения и формирующего каскада в едином схемном решении.

Коэффициент команды, определяющий уровень командного сигнала,

$$Q_k = (T_1 - T_2) / T_{\text{ши}} = U_c / U_{n0} \quad (1)$$

В приемном устройстве осуществляются амплитудное детектирование несущего колебания, разделение сигнала ШИМ-ЧМ по частотам поднесущих с помощью соответствующих фильтров, выделение огибающей импульсов поднесущих частот, формирование сигнала ЦИМ и его демодуляция. Временные диаграммы преобразования сигналов приемной стороной изображены на рис. 3.

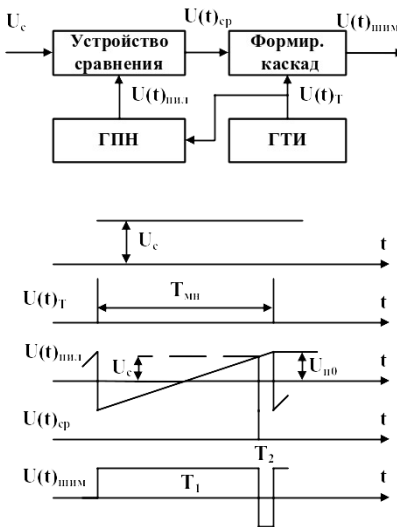


Рис. 2. Схема преобразователя ШИМ и эпоры напряжений

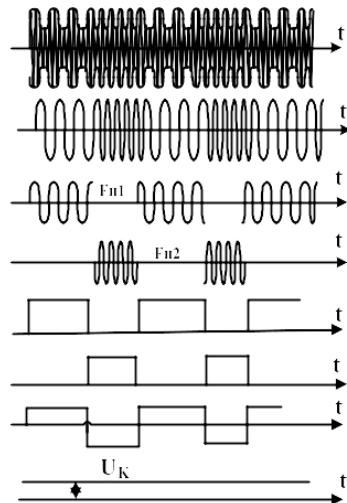


Рис. 3. Выделение командного напряжения из сигнала ШИМ-ЧМ-АМ

Напряжение командного сигнала на выходе приемного тракта

$$U_c^* = k_{\phi} U_m Q_k = \frac{k_{\phi} U_m}{U_{n0}} U_c \quad (2)$$

Итак, принятый командный сигнал пропорционален переданному U_c , если обеспечивается условие $k_{\phi} U_m / U_{n0} = \text{const}$, где k_{ϕ} - коэффициент передачи демодулятора ШИМ, U_m - уровень напряжения ШИМ, сформированного на приемной стороне, U_{n0} - уровень пилообразного напряжения передающей стороны. Наименьшее число каналов командной радиолинии ШИМ-ЧМ-АМ равно 2.

Функциональные схемы приемного и передающего устройств

приведены на рис. 4 и 5.

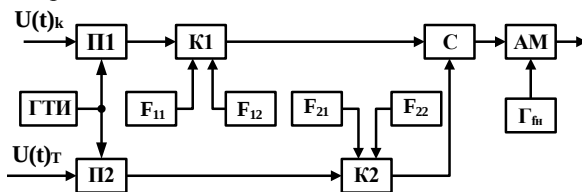


Рис. 4. Функциональная схема передающего устройства: П1, П2 – преобразователи ШИМ; ГТИ – генератор тактовых импульсов; F_{11} , F_{12} , F_{21} , F_{22} – генераторы поднесущих частот; К1, К2 – коммутаторы; С – сумматор; АМ – амплитудный модулятор; $\Gamma_{\text{н}}$ – генератор несущего колебания

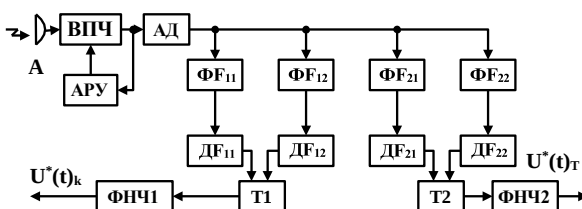


Рис. 5. Функциональная схема приемного устройства: ВПЧ – высокочастотный преобразователь; АД – амплитудный детектор несущего колебания; АРУ – система автоматической регулировки усиления; ΦF_{11} – ΦF_{22} – фильтры поднесущих частот; ΔF_{11} – ΔF_{22} – детекторы поднесущих частот; Т1, Т2 – триггеры; ФНЧ1, ФНЧ2 – фильтры нижних частот

2. Спектр сигнала ШИМ-ЧМ-АМ

На рис. 6 показан амплитудный спектр модулирующего сигнала $G_M(f)$ и излучаемого сигнала $G_S(f)$ двухканальной радиопередачи при непрерывной передаче постоянных команд $Q_{k1}=0$ и $Q_{k2}>0$.

В спектре модулирующего сигнала $G_M(f)$ имеются дискретные составляющие на частотах поднесущих колебаний первого и второго каналов ($F_{11}, F_{12}; F_{21}, F_{22}$), а также дискретные составляющие на частотах $F_{11} \pm 2\pi l / T_{\text{мн}}$; $F_{12} \pm 2\pi l / T_{\text{мн}}$; $F_{21} \pm 2\pi l / T_{\text{мн}}$; $F_{22} \pm 2\pi l / T_{\text{мн}}$ (где $l=1, 2, \dots$). Огибающая дискретного спектра сигнала первого класса ($Q_{k1}=0$) определяется спектром одиночного импульса длительностью $T_{\text{мн}}/2$. Спектральные составляющие сигнала F_{11} и F_{12} имеют одинаковые амплитуды. Ширина спектра на поднесущих колебаниях второго канала ($Q_{k2}>0$) определяется длительностью более короткого импульса

($T_1 > T_2$). Импульсы большой длительности обладают большей энергией, поэтому интенсивности спектральных составляющих на поднесущих F_{21}, F_{22} будут различны.

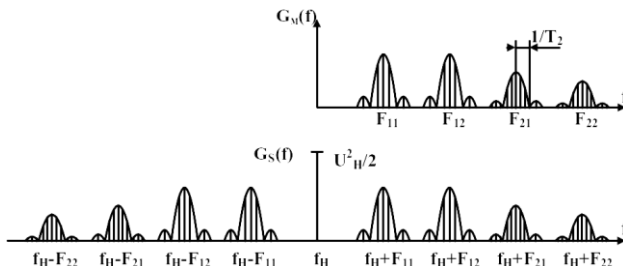


Рис.6. Спектр сигнала ШИМ-ЧМ-АМ

Излучаемый сигнал радиолинии имеет спектр $G_S(f)$, который соответствует амплитудной модуляции несущего колебания. Спектр излучаемого сигнала содержит две симметричные боковые полосы и центральную составляющую на частоте несущего колебания.

На приемной стороне происходит демодуляция сигнала, в результате чего на выходах канальных триггеров T_1 и T_2 формируются сигналы ШИМ. В том случае, когда $U_{kc} = \text{const}$, спектр сигнала на выходе канального триггера определяется временными интервалами T_1 и T_{mn} . Интенсивность спектральной составляющей на частоте $\omega = 0$ пропорциональна коэффициенту команды.

Рассмотрим случай, когда U_{kc} представляет собой стационарный процесс со спектральной плотностью $G_{kc}(\omega)$. Сигнал на выходе канального триггера по установившейся терминологии будет представлять собой импульсный случайный процесс с детерминированным тактовым интервалом. Его энергетический спектр является суммой непрерывной и дискретной частей.

В спектре сигнала ШИМ содержится компонента, повторяющая сообщение без частотных искажений (на рис. 7 заштрихована). Остальные компоненты непрерывной части будут подвержены частотным искажениям.

Рассмотрим случай, когда $U_{kc} = \text{const}$, а радиолиния находится под воздействием белого шума. Влияние шума приведет к флуктуациям временных интервалов T_1 , T_2 , T_{mn} – т.е. будет происходить дополнительная помеховая двухсторонняя ШИМ. Энергетический спектр такого сигнала будет иметь вид:

$$G_{\Theta_{ij}}(\omega) = \frac{2U_0^2}{T_{ij}\omega^2} \left\{ 2 \left[1 - \operatorname{Re} \Theta_{1r}(\omega) \right] - \left| \Theta_{1r}(\omega) \right|^2 \times \right. \\ \left. \times \left[1 - 2 \operatorname{Re} \Theta_{1r}(\omega) + \left| \Theta_{1r} \right|^2 \right] + \left| \Theta_{1r}(\omega) \right|^2 \left[1 - 2 \operatorname{Re} \Theta_{1r}(\omega) \right] + \right. \\ \left. + \left| \Theta_{1r}(\omega) \right|^{\frac{2\pi}{T}} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - 2\pi r / \dot{\Theta}_{ij}) \right\}, (3)$$

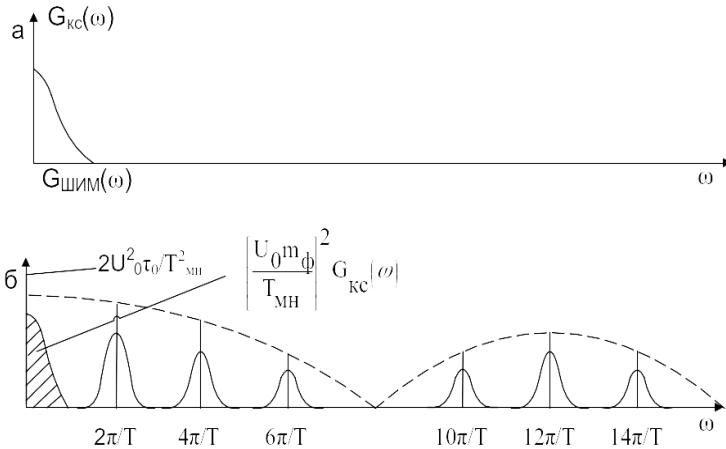


Рис. 7. Энергетический спектр сигнала ШИМ: а – спектр командного сигнала; б – спектр сигнала с ШИМ (U_0 – амплитуда импульса ШИМ, τ_0 – средняя длительность импульсов, m_τ – коэффициент передачи модулятора)

где Θ_{1r} – характеристическая функция случайных смещений фронтов импульса ШИМ; Θ_{1v} – характеристическая функция флюктуаций импульсов ШИМ относительно тактового интервала; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция.

Энергетический спектр сигнала ШИМ при двухсторонней помеховой модуляции также будет состоять из непрерывной и дискретной частей.

Из формулы (3) следует, что помеховая ШИМ приведет к изменению спектра сигнала. Изменится энергия спектральных составляющих на всех частотах, включая частоту $\omega=0$. Это приведет к появлению систематической и флюктуационной ошибок при демодуляции командного сигнала.

3. Выбор параметров радиолинии

Коэффициент команды Q_k характеризует глубину широтно-импульсной модуляции. Максимальная величина коэффициента $Q_{\text{макс}}$ определяется формулой

$$Q_{\text{макс}} = (T_{1\text{макс}} - T_{2\text{мин}}) / T_{\text{мн}}.$$

Для уменьшения искажений передаваемой команды под воздействием помех целесообразно увеличить максимальную глубину модуляции сигнала, т.е. значение $Q_{\text{макс}}$. Однако при этом уменьшается длительность импульсов $T_{2\text{мин}}$, что вызывает расширение спектра поднесущего колебания. Поэтому часто величину $Q_{\text{макс}}$ ограничивают величиной $|Q_{\text{макс}}| = 0,8 \div 0,9$. Максимальная ширина отдельных частотных полос спектра поднесущих определяется как

$$\Delta F_{\text{пн}} \approx (2 \div 4) / T_{2\text{мин}}.$$

Ширина полосы пропускания разделительных фильтров определяется по формуле

$$\Delta F_{\text{рф}} \approx 3\alpha_{\text{ф}} F_{\text{пн}} + \Delta F_{\text{пн}},$$

где $\alpha_{\text{ф}}$ — коэффициент относительной среднеквадратичной нестабильности настройки фильтров (обычно $\alpha_{\text{ф}} \approx 0,5 \cdot 10^{-2}$ для LC резонансных фильтров).

Значение частот поднесущих колебаний должны отстоять друг от друга на величину

$$\Delta F_0 = \alpha_3 \Delta F_{\text{рф}}.$$

Коэффициент запаса $\alpha_3 = 1,3 \div 1,5$. Минимальное значение частоты поднесущего колебания определяется из условия

$$F_{\text{пнмин}} \geq 10 / T_{1\text{мин}}.$$

Максимальное значение частоты поднесущего колебания $F_{\text{пнмакс}}$ ограничено допустимым расширением спектра изучаемого сигнала F_c и определяется из формулы

$$F_c = 2(F_{\text{пнмакс}} + \Delta F_{\text{пн}} / 2).$$

4. Воздействие шума на радиолинию

Как отмечалось выше, влияние шума приводит к флуктуациям моментов срабатывания канального триггера на приёмной стороне. Эти флуктуации приводят к тому, что командный сигнал оказывается состоящим из полезной $U_{\text{кс}}$ и помеховой $U_{\text{пх}}$ составляющих:

$$U_{\text{ккс/ш}} = U_{\text{кс}} + U_{\text{пх}}. \quad (4)$$

Влияние помеховой составляющей командного сигнала приводит

к появлению систематической и флюктуационной ошибок. Появление систематической ошибки объясняется тем, что спектр сигнала ШИМ искажается шумами таким образом, что среднее значение командного сигнала на выходе ФНЧ не будет равно среднему значению при отсутствии шума.

Оценивая полезную и помеховую составляющие командного сигнала (4), устанавливают эквивалент радиоприемной линии в контуре управления.

Структура радиоэквивалента линии (рис. 8) включает в себя следующие элементы:

- 1) безынерционную часть с коэффициентом передачи $k_{\phi} U_m / U_{no}$;
- 2) помеху, обуславливающую систематическое смещение командного сигнала при действии шума

$$\Delta U_{k/u} = k_{\phi} U_m (1 - Q_{k \max}) / m_a F_2(n_1 \alpha_3) \sqrt{G_{шкx} / P_n T_{mn} m} ; \quad (5)$$

- 3) помеху, обуславливающую флюктуации командного сигнала из-за действия шумов, спектральная плотность которой

$$G(0)_{фкс} = 2 k_{\phi}^2 U_m^2 G_{шкx} (1 - Q_{k \max}) / m_a^2 P_n F_2^2(n_1 \alpha_3) ; \quad (6)$$

- 4) инерционную фильтрующую часть с коэффициентом передачи $(P)_{ФН}$.

В зависимостях (5) и (6) обозначено: $G_{шкx}$ – спектральная плотность шума на выходе приёмника; $Q_{k \max}$ – максимально допустимый коэффициент команды; P_n – мощность принимаемого несущего колебания; U_m – уровень сигнала, формируемый триггером приемника; m_a – коэффициент амплитудной модуляции несущего колебания поднесущими частотами; T_{mn} – период манипуляции поднесущих частот; $m = 1/2 F_{вск} T_{mn}$ – коэффициент запаса на условие Котельникова:

$$F_2(n, \alpha) = 1 + \alpha_2 (n+4) + \alpha_3^2 (n-1)(4,5 + n/2),$$

где n – число используемых поднесущих частот; α_3 – относительная ширина разделительных частотных интервалов между полосами фильтров поднесущих частот.

Входным воздействием на радиоэквивалентной линии является передаваемое командное напряжение $U_{ксо}$. Выходным сигналом радиоэквивалента является принятое напряжение $U_{кспр}$.

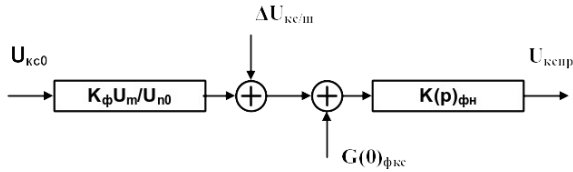


Рис. 8. Радиоэквивалент линии

Относительная ошибка в передаче командного сигнала, обусловленная систематическим влиянием шумов, оценивается зависимостью:

$$\beta_Q = (\Delta U_{кс/ш}) / [U_{кспр}]_{\max}, \quad (7)$$

где $[U_{кспр}]_{\max}$ - принимаемый не искаженный шумами командный сигнал максимального уровня.

Корректируя зависимость (7), можно показать, что при $n > 4$

$$\beta_Q = \frac{8}{m_A^3} \left(\frac{G_{\sigma \dot{\sigma}}}{E_I \dot{O}_{I I}} \right)^{3/2}, \quad (8)$$

а при $n \leq 4$

$$\beta_Q = \frac{8}{m_A^3} \left(\frac{G_{\sigma \dot{\sigma}}}{E_I \dot{O}_{I I}} \right)^{3/2} \cdot F(n, \alpha_3), \quad (9)$$

$$F(n, \alpha_3) = \frac{(n+4) + \alpha_3(n-1)(4,5+n/2)}{1 + \alpha_3(n+4) + \alpha_3^2(n-1)(4,5+n/2)}.$$

где

Флюктуационное влияние шума на ошибку в передаче команды оценивается среднеквадратическим уровнем флюктуаций принятого командного сигнала

$$\sigma_{\dot{\sigma} \dot{\sigma}} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(0)_{\dot{\sigma} \dot{\sigma}} |K(j\omega)_{\dot{\sigma} I}|^2 d\omega \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

При этом относительная флюктуационная ошибка в передаче командного сигнала

$$\beta_{\phi} = \frac{\sigma_{\kappa\phi}}{[U_{\kappa\text{про}}]_{\max}} = \frac{1-Q_{k\max}}{m_A F_2(n_1 \alpha_3)} \sqrt{\frac{2 G_{\text{швх}}}{P_n} \Delta F_{\text{эл}}}, \quad (11)$$

$$\Delta F_{\text{эл}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |K(j\omega)_{\text{рн}}|^2 d\omega$$

где - эффективная полоса радиозэквивалента линии.

5. Передача разовых команд

Разовая команда может передаваться как с использованием самостоятельных поднесущих частот, аналогично передаче главных команд, так и с помощью тональной частоты F_p , которой осуществляется амплитудная модуляция поднесущих частот главной команды. При этом на приемной стороне вводится канал выделения разовой команды, включающий в себя полосовой фильтр поднесущих частот, детектор поднесущих частот и фильтр разовой команды, настроенный на тональную частоту F_p .

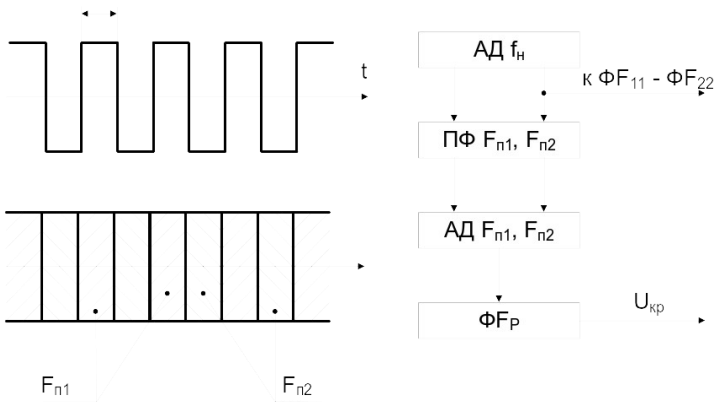


Рис. 9. Передача и выделение разовой команды: АД f_n – амплитудный детектор несущего колебания; ПФ F_{n1}, F_{n2} – полосовой фильтр поднесущих; АД F_{n1}, F_{n2} – амплитудный детектор поднесущих; ΦF_p – фильтр F_p ; $\Phi F_{11} \div F_{22}$ – фильтры поднесущих частот главной команды

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

В системе SestemView создан файл ШИМ.svu, содержащий схему, имитирующую работу командной радиолинии ШИМ-ЧМ-АМ. Модель позволяет посмотреть осциллограммы в контрольных точках, оценить точность передачи команд в радиолинии, исследовать взаимное влияние каналов курса и тангажа, оценить влияние шумов на работу системы. Структурная схема имитатора приведена на рис. 9.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запустить систему SystemView и вызвать файл ШИМ.svu.
2. Выставить командное напряжение канала курса, для чего:
 - установить курсор на блок 2 (датчик команд курса);
 - двойным нажатием левой кнопки мыши вызвать контекстное меню;
 - нажатием кнопки Parameters вызвать окно установки параметров;
 - в графе Amplitude (v) установить требуемое значение напряжения (в пределах от -0,9 В до +0,9 В) и нажать кнопку ОК.
3. Выставить командное напряжение канала тангажа, используя методику, описанную в п. 2, курсор установить на блок 10 (датчик команд тангажа).
4. Провести временной анализ устройства, для чего нажать кнопку ► основного меню. Номер каждой осциллограммы (например, Sink 5) соответствует номеру блока отображения данных (например, 5). Чтобы определить название устройства, к которому подключен блок отображения данных, достаточно подвести курсор к нужному блоку. Всплывающая подсказка содержит название устройства и его основные характеристики.
5. Зарисовать спектр сигнала на выходе сумматора (блок 21), для чего:
 - войти в меню View и выбрать функцию Analysis Window;
 - подвести курсор к осциллограмме Sink 22 (на выходе сумматора);
 - правой кнопкой мыши вызвать контекстное меню;
 - выбрать функцию Sink Calculator;

- нажать кнопку Spectrum;
- нажать кнопку | FFT | и нажать ОК.

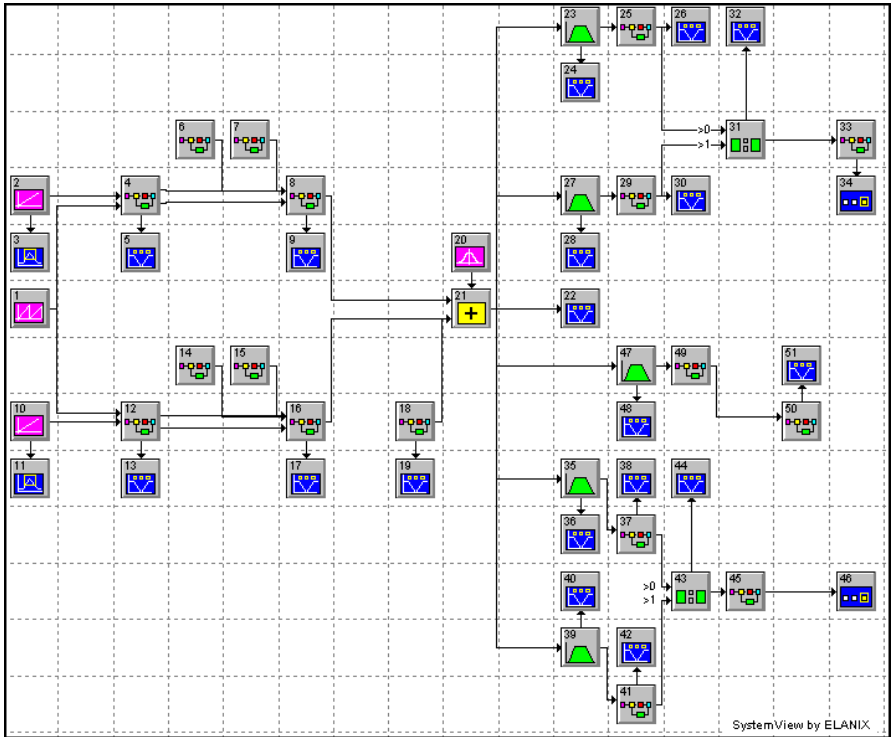


Рис. 10. Структурная схема имитатора командной радиолинии ШИМ-ЧМ-АМ:

1 – генератор тактовых импульсов; 2, 10 – датчики команд курса и тангажа; 4, 12 – преобразователи ШИМ; 6, 7, 14, 15 – генераторы поднесущих частот F_{11} , F_{12} , F_{21} , F_{22} ; 8, 16 – переключатели поднесущих; 18 – генератор разовой команды; 20 – генератор шума; 21 – сумматор; 23, 27, 35, 39 – фильтры поднесущих частот F_{11} , F_{12} , F_{21} , F_{22} ; 25, 29, 37, 41 – амплитудные детекторы; 31, 43 – триггеры; 33, 45 – фильтры нижних частот; 47 – полосовой фильтр разовой команды; 49 – амплитудный детектор разовой команды; 50 – индикатор разовой команды; 3, 5, 9,

11, 13, 17, 19, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 51 – устройства отображения информации

6. Для канала курса снять зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от уровня командного напряжения $U_{\text{к}}$, для чего:

- весь диапазон изменений $U_{\text{к}}$ (от -0,9 до +0,9) разбить на десять интервалов;
- установить первое значение $U_{\text{к}}$ (использовать методику, изложенную в п.2);
- нажать кнопку ►;
- записать в таблицу значения $U_{\text{к}}$ и $U_{\text{вых}}$ (значение $U_{\text{вых}}$ отображает устройство Sink 34);
- изменить значение $U_{\text{к}}$ и повторить изложенные выше операции.

7. Исследовать взаимное влияние каналов курса и тангажа, для чего:

- двойным нажатием левой кнопки мыши открыть метасистему 14 (генератор поднесущей F_{21});
- дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на значке источника синусоидального сигнала;
- нажатием кнопки Parameters вызвать окно установки параметров;
- установить значение частоты (Frequency), равное 1200 Гц и нажать ОК;
- командное напряжение для канала тангажа (блок 10) установить равным +0,5 В;
- снять зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{к}})$ для канала курса (напряжение тангажа $U_{\text{т}}$ установить равным 0,7);
- установить значение частоты F_{21} , равное 1500 Гц (график не снимать);
- закрыть метасистему;
- двойным нажатием левой кнопки мыши открыть метасистему 7 (генератор поднесущей F_{12});
- по методике, изложенной выше, установить значение частоты F_{12} , равное 1400 Гц;
- командное напряжение для канала курса (блок 2) установить равным -0,5 В;
- снять зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{к}})$ для канала тангажа (командное напряжение $U_{\text{к}}$ менять в блоке 10, значение $U_{\text{вых}}$ отображает устройство Sink 46) (напряжение курса $U_{\text{к}}$ установить равным -0,5);
- установить значение частоты F_{12} , равное 1000 Гц.

8. Исследовать влияние шума на точность передачи команд, для чего:

- дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на блоке 20 (источник гауссовского шума);
 - нажатием кнопки Parameters вызвать окно установки параметров;
 - установить значение $U_{\text{ш}}$ (Std Deviation), равное 5, и нажать ОК;
 - по методике, изложенной выше, снять зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{к}})$ для канала курса;
 - снять зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{к}})$ для значений $U_{\text{ш}}$, равных 7 и 10.
9. Построить полученные зависимости и объяснить результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Способы командного радиопреуправления.
2. Структура замкнутого контура при командном радиопреуправлении.
3. Принципы действия командной радиолнии ШИМ-ЧМ-АМ.
4. Функциональная схема передающего устройства радиолнии ШИМ-ЧМ-АМ.
5. Функциональная схема приемного устройства радиолнии ШИМ-ЧМ-АМ.
6. Принципы передачи разовых команд в радиолнии ШИМ-ЧМ-АМ.
7. Спектр сигнала ШИМ-ЧМ-ЛМ.
8. Из каких соображений выбираются поднесущие частоты?
9. Из каких соображений выбирается полоса фильтра поднесущей частоты?
10. Как оценить требуемую полосу частот приемного устройства?
11. Из каких соображений выбирается частота коммутации поднесущих частот?
12. Какие факторы влияют на точность передачи команд?
13. Характер межканальных помех в линии ШИМ-ЧМ-АМ.
14. Как влияет шум на передачу команд?
15. Какова структура радиоэквивалента линии ШИМ-ЧМ-АМ?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волковский С.А., Оноприенко Е.И., Савинов В.А. Радиоустройства систем управления летательным аппаратом. М.: Машиностроение, 1972. 464 с.
2. Основы радиопреуправления / под ред. В.А. Вейцеля и В.Н. Типугина. М.: Сов. радио, 1973. 462 с.

Лабораторная работа № 4

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ В РАДИОЛУЧЕ

1. Принцип действия системы управления в радиолуче

Система управления в луче (рис. 1) работает следующим образом [1,2]. Радиовизир цели РВЦ в системе координат $(0, X_0, Y_0, Z_0)$ определяет угол места цели $\beta_{ц}$, азимут цели $\alpha_{ц}$, расстояние до цели $r_{ц}$ и вырабатывает соответственно измеренным величинам напряжения $U_{\beta_{ц}}$, $U_{\alpha_{ц}}$, $U_{r_{ц}}$. Эти напряжения поступают на счётно-решающий прибор СРП. СРП обеспечивает с учётом метода наведения пересчет местоположения цели от координатной системы РВЦ в координатную систему $(0, X_{л}, Y_{л}, Z_{л})$ устройства формирования луча УФЛ, выдавая на УФЛ напряжения $U_{\beta_{л}}$ и $U_{\alpha_{л}}$, являющиеся приборными аналогами угла места $\beta_{л}$ и азимута $\alpha_{л}$ цели в измерительной системе координат УФЛ. Напряжения $U_{\beta_{л}}$ и $U_{\alpha_{л}}$ управляют положением радиолуча в пространстве так, что ось луча $X_{л}$ непрерывно направляется либо на цель, либо в упреждённую точку. Совмещение оси луча $X_{л}$ с выбранной точкой пространства осуществляется с ошибкой $\Delta\phi$. С радиолучом связана система координат $(0, X_{л}, Y_{л}, Z_{л})$, привязанная к измерительной системе координат УФЛ азимутом $\alpha_{л}$ и углом места $\beta_{л}$.

Образуется радиолуч путём конического сканирования диаграммы направленности антенн с круговой частотой $\Omega_{ск}$. Передатчик УФЛ генерирует периодические радиоимпульсы постоянной амплитуды и длительности.

Рис. 2. Система координат радиолуча

Рис. 3. Геометрические соотношения в картинной плоскости

Для определения по ЛА фазы сигнала система УФЛ формирует и передает специальные сигналы, позволяющие получать на ЛА опорное напряжение, однозначно связанное с положением максимума диаграммы направленности антенны радиолуча относительно координатных осей Z_0 Y_0 . В качестве таких сигналов используются импульсно–временные коды (ИВК), передаваемые в моменты прохождения лучом точек $C1, C2, C3, C4$ (рис. 3).

После выделения бортовым приёмником огибающей принятого сигнала получаем информацию о положении ЛА в полярной системе

координат луча (информация о $|\tau_l|$, ψ_l). Для управления ЛА необходимо преобразовать информацию о его положении в полярной системе координат луча в исполнительную координатную систему (C , Y_c , Z_c), связанную с ЛА (рис. 4). Результатом такого преобразования выделенной на борту ЛА огибающей принятого сигнала являются командные напряжения, обеспечивающие ускорения ЛА по осям Y_c и Z_c , т.е. по курсу и тангажу.

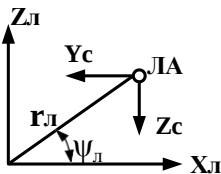


Рис. 4. К взаимной связи координат

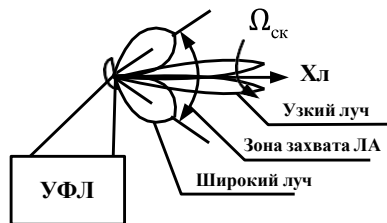


Рис. 5. Управление ЛА на стартовом участке

Отметим особенности управления ЛА на стартовом участке (рис. 5). Если после старта ЛА подойдёт к радиолучу со слишком большой скоростью и под острым углом, то он может пролететь зону, в которой возможно управление, и будет потерян. Поэтому на

стартовом участке применяется широкий радиолуч с диаграммой направленности в $20...50^\circ$. После захвата ЛА широким лучом и введения ЛА в равносигнальную зону широкого луча на борту ЛА происходит переключение приёмного тракта с широкого луча на узкий, и дальнейшее управление идёт в узком луче, ширина диаграммы направленности которого около 1° . Для получения широкой и узкой диаграмм направленности применяют антенну с двумя вибраторами, работающими на разных частотах. Потеря ЛА возможна и за счёт боковых лепестков диаграммы направленности антенны УФЛ. Система управления должна работать с момента выхода ЛА из зоны боковых лепестков.

Структурная схема аппаратуры устройства формирования радиолуча и эпюры напряжений, поясняющие её работу, приведены на рис. 6, 7. На рис. 6 обозначено: 1 - генератор тактовых импульсов; 2 - переключатель кодирующих устройств; 3, 4 - кодирующие устройства; 5 - ключ; 6 - элемент задержки; 7 - генератор синусоидального напряжения; 8 - сумматор; 9 - модулятор; 10, 11 - формирователь узкого и широкого луча; 12 - привод антенны; 13 - следящий привод. На рис. 7 эпюры напряжений соответствуют: а - напряжение, управляющее электродвигателем антенны; б - последовательность импульсов с выхода генератора тактовых импульсов; в, г - импульсно-временные коды; д - последовательность импульсов с выхода ключа; е - сигнал с выхода сумматора.

Устройство формирования луча работает следующим образом. Несимметрично расположенный излучатель передающей антенны вращается с частотой $\Omega_{\text{ск}}$. Вращением излучателя управляет привод антенны 12. Напряжение с частотой $\Omega_{\text{ск}}$ с электродвигателя привода

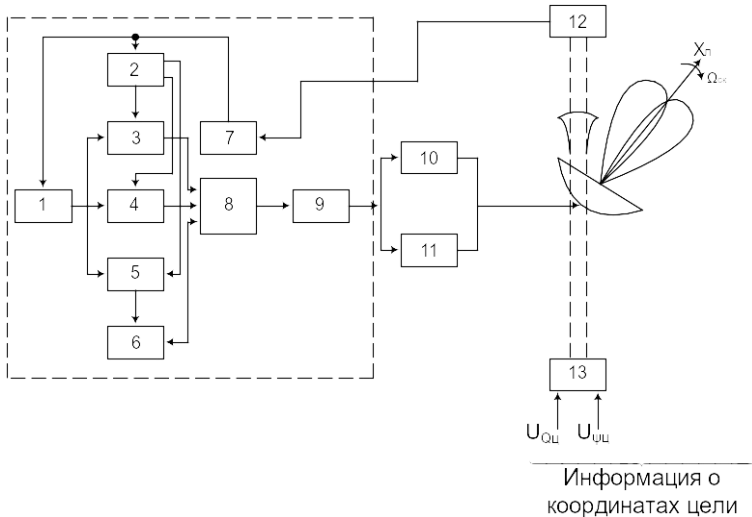


Рис. 6. Функциональная схема устройства формирования луча

антенны является синхронизирующим для генератора 7. Фаза напряжения с частотой $\Omega_{\text{ск}}$ подобрана так, что при прохождении максимумом диаграммы направленности точек $C1, C2, C3, C4$ (рис. 3) она будет равна 0, 90, 180, 270 ° (рис.7, а). Напряжение с выхода генератора 7 управляет работой переключателя кодирующих устройств и синхронизирует генератор импульсов 1 (рис.7, б). С помощью переключателя 2 в момент времени, соответствующий точке $C1$, включается кодирующее устройство 3, в момент, соответствующий точке $C3$, - кодирующее устройство 4 (рис.7, в, г). В момент времени $C1, C2$ формируются импульсно-временные коды, которые отличаются расстановкой импульсов внутри интервала времени. Импульсы с выхода генератора тактовых импульсов через ключ 5, элемент задержки 6 поступают на сумматор 8, на выходе которого формируется сигнал, управляющий работой модулятора (рис.7, е). Ключ сигналом с выхода переключателя кодирующих устройств 2 (рис.7, г) закрывается на время формирования импульсно-временных кодов. Последовательность импульсов на выходе ключа приведена на рис. 7, д. Для обеспечения положения послед-

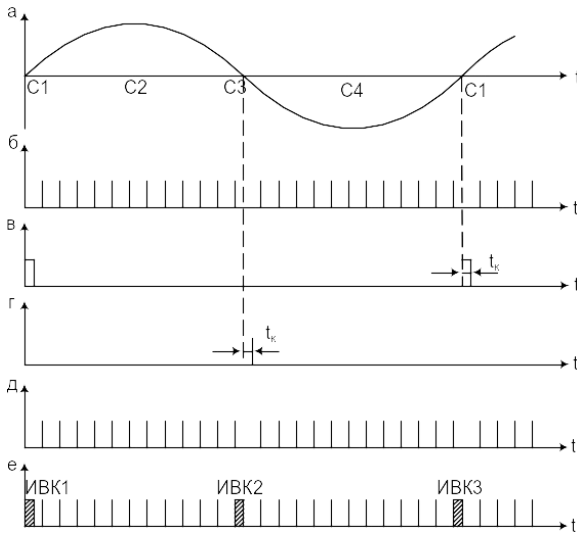


Рис.7. Временные диаграммы, поясняющие работу устройства формирования луча

него импульса ИВК на одинаковом временном расстоянии от предыдущего и последующих тактовых импульсов в схему введён элемент задержки. Задержка упрощает селекцию импульсов в бортовом радиоприёмном устройстве. Антенна устройства формирования луча имеет два синхронно вращающихся вибратора, которые питаются от генератора высокой частоты. Вибраторы излучают различные несущие частоты, поэтому передающей антенной формируются соответственно «широкий» и «узкий» лучи. Положение радиолуча в пространстве определяется приборными аналогами угла места $U \Theta_u$ и азимута $U \Psi_u$, поступающими со счётно-решающего прибора на следующий привод управления радиолучом.

Функциональная схема бортового приёмного устройства приведена на рис. 8, а временные диаграммы - на рис. 9.

Приёмник содержит два тракта усиления и преобразования сигнала (для узкого и широкого радиолучей), работающие на разных несущих частотах. По окончании стартового участка тракты переключаются так, что при вводе снаряда в радиолуч работает тракт широкого луча, а когда сигнал рассогласования в этом тракте станет малым, включается тракт узкого луча. На выходе приёмника (выход блока 6)

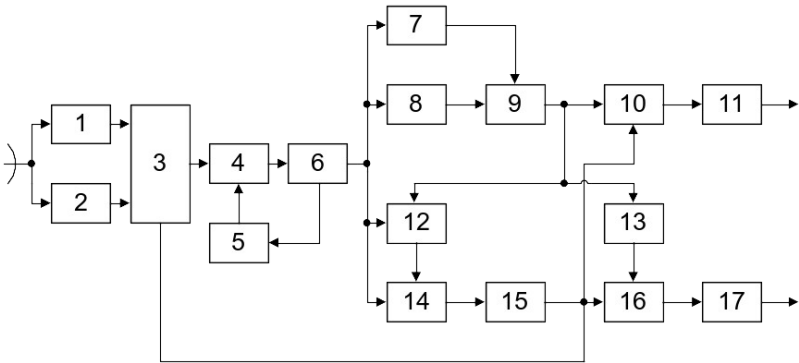


Рис. 8. Функциональная схема бортового приемного устройства системы наведения по радиолучу: 1, 2 - тракты узкого и широкого лучей; 3 - переключатель ширины луча; 4 - УПЧ; 5 - система АРУ; 6 - амплитудный детектор; 7, 8 - декодирующие устройства тактовых ИВК; 9 - триггер; 10, 16 - фазовые детекторы; 11, 17 - выходные фильтры; 12 - генератор строб-импульсов; 13 - фазовращатель; 14 - детектор сигнала ошибки; 15 - фильтр сигнала ошибки

формируется последовательность импульсов, модулированных по амплитуде (рис.9, а). Огибающая этой последовательности имеет частоту $\Omega_{ск}$. Фаза огибающей зависит от местоположения ЛА. В этом случае, если ЛА находится на оси Z (рис. 3), ИВК1 совпадают с точками 1, а ИВК2 – с точками 2. Если ЛА не имеет отклонения от равносигнальной зоны, то амплитудная модуляция сигнала, принимаемого бортовой антенной, отсутствует.

Декодирующие устройства, входящие в состав приёмника, декодируют ИВК (рис. 9, б, в). Выходные импульсы декодирующих устройств синхронизируют триггер. Триггер вырабатывает для канала тангажа опорное напряжение (рис. 9, г), фаза которого жёстко связана с начальным положением в пространстве диаграммы направленности передающей антенны. Опорное напряжение для канала курса (рис. 9, д), сдвинутое на четверть периода по отношению к опорному напряжению канала тангажа, снимается с фазовращателя.

Прямоугольное напряжение с выхода триггера подается также на генератор стробирующих импульсов (рис. 9, е). Этот генератор

вырабатывает последовательность импульсов, которые открывают детектор

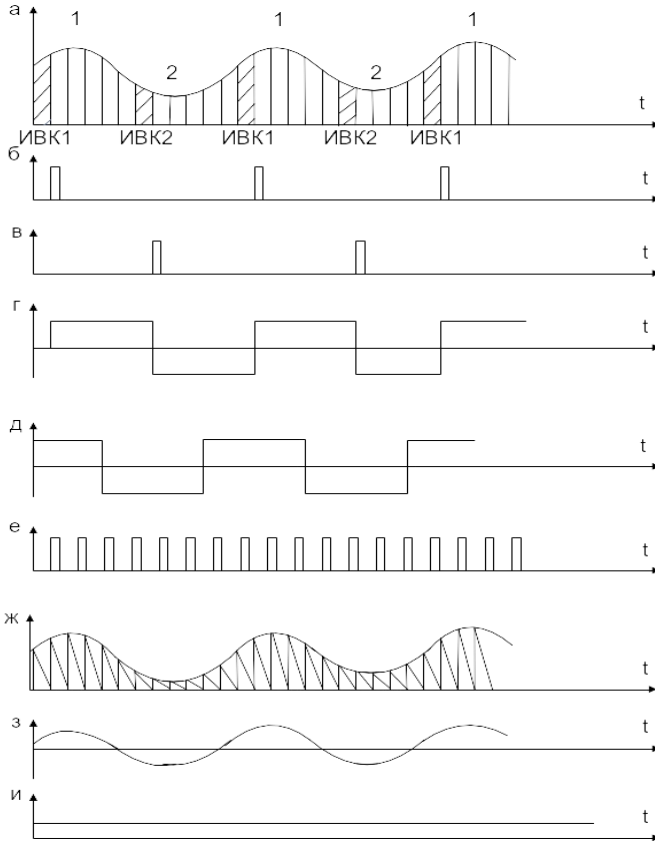


Рис. 9. Временные диаграммы, поясняющие работу приемного устройства: а – сигнал на выходе амплитудного детектора приемника; б, в – импульсы, снимаемые с выхода декодирующих устройств; г – сигнал, снимаемый с выхода триггера; д – сигнал, снимаемый с фазовращателя; е – последовательность стробирующих импульсов; ж – сигнал на выходе детектора сигнала ошибки; з – сигнал с выхода фильтра сигнала ошибки; и – командное напряжение.

сигнала ошибки в момент прихода рабочих импульсов. Стробирование сигнала ошибки позволяет увеличить отношение сигнал/шум на его выходе. Назначение детектора сигнала ошибки и

фильтра сигнала ошибки – выделить сигнал ошибки, в котором заложена информация о местоположении ЛА относительно равносигнальной зоны. В спектре сигнала, снимаемого с АД приёмника (рис. 9, а), содержится спектральная составляющая с частотой $\Omega_{ск}$. Однако её энергия при большой скважности импульсов мала. С помощью детектора сигнала ошибки происходит «растяжение» рабочих импульсов (рис. 9, ж). Благодаря этому энергия спектральной составляющей на частоте $\Omega_{ск}$ увеличивается. Поэтому амплитуда сигнала ошибки, снимаемого с фильтра сигнала ошибки (рис. 9, з), увеличивается. Опорное напряжение и сигнал ошибки поступают на фазовые детекторы. Фазовые детекторы тангажа и курса выдают напряжения, величины которых пропорциональны углу между сигналом ошибки и опорным сигналом:

$$(2) \quad \begin{aligned} U_{\kappa} \Theta &= \kappa_{\PhiД} U_{co} \sin \Psi_{л}; \\ U_{\kappa} \Psi &= \kappa_{\PhiД} U_{co} \cos \Psi_{л}, \end{aligned}$$

где $\kappa_{\PhiД}$ – коэффициент передачи ФД; U_{co} – сигнал ошибки.

Фильтр на выходе детектора предназначен для фильтрации гармоник частоты $\Omega_{ск}$, уменьшения флуктуаций командного напряжения (рис. 9, и), вызванных воздействием на систему помех.

Из формул (2) следует, что фазовые детекторы, выходные фильтры, триггер и фазовращатель представляют собой преобразователь координат, с помощью которого происходит переход от полярных координат к декартовым.

2. Выбор основных параметров системы управления

Результат действия помех, при прочих равных условиях, уменьшается с увеличением чувствительности антенны μ_{Σ} устройства формирования луча. Угловая чувствительность антенны

$$\mu_{\Sigma} = \pi / \Psi_{A0} \operatorname{tg} (\pi \Psi_{\Sigma} / \Psi_{A0}).$$

Из полученного соотношения видно, что увеличивать μ_{Σ} можно либо увеличивая отклонения максимума диаграммы направленно-

сти (Ψ_A), либо уменьшая ширину главного лепестка диаграммы (Ψ_{AO}), как это показано на рис. 10.

Увеличение значения Ψ_A приводит к уменьшению мощности излучения в направлении равносигнальной зоны. Возможности сужения диаграммы также ограничены, так как при узкой ДН повышается вероятность потери управления при манёвре цели.

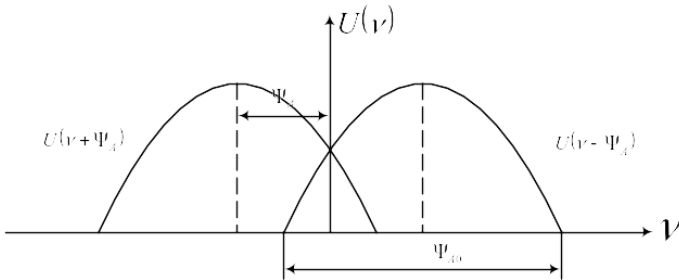


Рис. 10. Два крайних положения диаграммы направленности передающей антенны (в декартовой системе координат)

Характеристики бортовой приёмной антенны также влияют на качество наведения. Бортовая антенна устанавливается в хвостовой части ЛА. Её диаграмма направленности сориентирована вдоль продольной оси ЛА. Повышение коэффициента направленности позволяет увеличить мощность принимаемого сигнала и затрудняет постановку радиопомех. Но развороты снаряда при направленной антенне приводят к замираниям сигнала на входе приёмника. Поэтому остронаправленной приёмную антенну делать нельзя.

Если в передающей антенне сканирование осуществляется за счёт вращения облучающего вибратора, то плоскость поляризации принимаемых сигналов также будет вращаться с частотой $\Omega_{ск}$. Выполнение бортовой антенны с круговой поляризацией устраняет паразитную модуляцию принимаемого сигнала.

К системе автоматической регулировки усиления предъявляются весьма жёсткие требования, так как при движении ЛА вдоль радиолуча изменение уровня принимаемого сигнала оказывается очень большим. Поэтому часто приходится вводить в приёмное устройство блок программного регулирования коэффициента усиления.

Жёсткие требования предъявляются и к фильтру сигнала ошибки. Полоса пропускания этого фильтра должна быть достаточно

узкой, обеспечивающей эффективную фильтрацию. Расстройка фильтра относительно частоты $\Omega_{ск}$ недопустима, так как из-за неё появляется дополнительный фазовый сдвиг Φ в сигнале ошибки. Фазовый сдвиг Φ приводит к возникновению перекрёстных связей контуров курса и тангажа. Коэффициент связи будет пропорционален величине $\sin \Phi$. Перекрёстные связи изменяют процесс регулирования в контуре управления и уменьшают запас устойчивости.

3. Контур управления

Система управления в луче имеет два контура управления – по курсу и тангажу, которые в общем случае взаимосвязаны между собой. Пространственное положение ЛА в измерительной системе координат характеризуется по курсу азимутом $\alpha_{ЛА}$, по тангажу – углом места $\beta_{ЛА}$. Соответствующими характеристиками положения луча являются азимут $\alpha_{л}$ и угол места $\beta_{л}$. Таким образом, в измерительной системе координат рассогласование ЛА с радиолучом по курсу определено углом $\Psi_Y = \alpha_{ЛА} - \alpha_{л}$, а по тангажу – углом $\Psi_Z = \beta_{ЛА} - \beta_{л}$. Команда управления вырабатывается по углу $\Psi_{л}$. Поэтому кинематическое звено должно связать угол $\Psi_{л}$ (рис. 11) с углами $\alpha_{ЛА}$, $\alpha_{л}$, $\beta_{ЛА}$, $\beta_{л}$ [3]

$$\Psi_{л} = \sqrt{(\beta_{ЛА} - \beta_{л})^2 + (\alpha_{ЛА} - \alpha_{л})^2 \cos^2 \beta_{л}}. \quad (3)$$

Зависимость (3) определяет структуру кинематического звена контуров управления.

Далее структура радиозвена по каналам курса и тангажа определена зависимостью (2). Переход от $\Psi_{л}$ к командным сигналам $U_{кУ}$ и $U_{кЗ}$ осуществляется в несколько этапов. Во-первых, угловое рассогла –

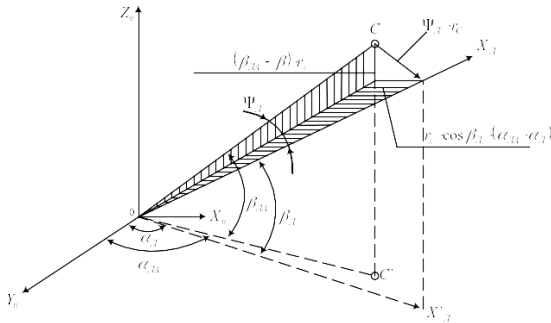


Рис. 11. К взаимной связи угла Ψ_L с углами $\alpha_{ЛА}$, α_L , $\beta_{ЛА}$, β_L

сование Ψ_L преобразуется в коэффициент амплитудной модуляции через звено с коэффициентом передачи, равным угловой чувствительности радиолуча μ_L . Во-вторых, уровень амплитудной модуляции по каналу курса и тангажа определён коэффициентами $m_{AY} = m_{ACOS} \eta_L$ и $m_{AZ} = m_{ASIN} \eta_L$. Соответственно в структуре радиозвеньев появляются элементы с коэффициентами передач $\cos \eta_L$, $\sin \eta_L$, которыми вектор $\vec{m}_A$ переводится в проекции по каналам курса и тангажа. В-третьих, безынерционными усилителями с коэффициентами передач

$$k_{ПY} = k_{ПZ} = k_o k_{co} U_{mo} \sqrt{R_{вх} P_{пер} D_{пер} S_{ант} / 2 \pi r_{max}^2}$$

величины m_{AY} и m_{AZ} преобразуются в напряжения, которые сглаживаются инерционным элементом $\Phi(p)$ радиозвеньев.

Командные напряжения $U_{кY}$, $U_{кZ}$ звеньями автопилот-корпус $\Phi(p)_{ак}$ преобразуются в поперечные ускорения $W_{ПY}$, $W_{ПZ}$, переводимые динамическими звеньями $\Phi(p)_{оз}$ в изменение положения ЛА по курсу и тангажу ($\alpha_{ЛА}$ и $\beta_{ЛА}$).

Структурная схема контуров управления по курсу и тангажу системы управления в луче приведена на рис. 12.

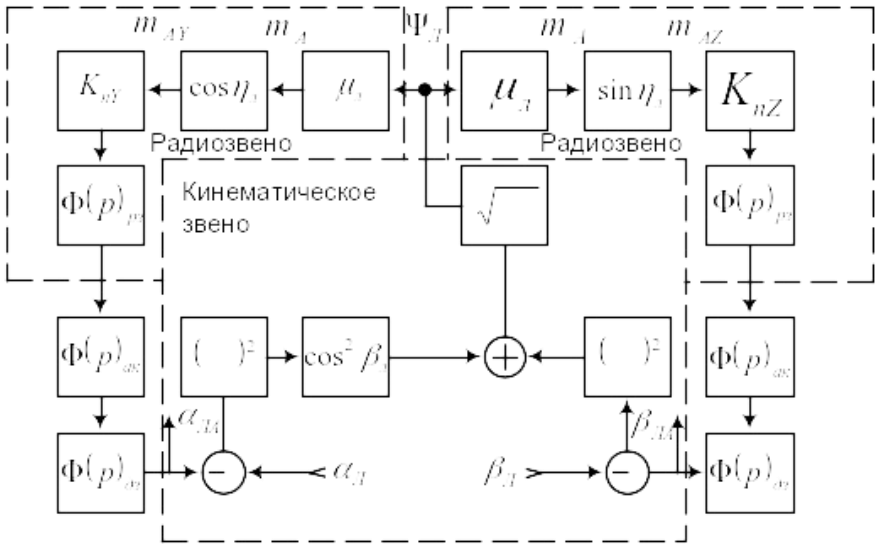


Рис. 12. Структурная схема контуров управления по курсу и тангажу

4. Ошибки управления

Для системы управления в луче характерными являются четыре вида ошибок.

Во-первых, ошибка, обусловленная неточным наведением луча на цель. Причиной этого могут быть ошибки радиовизира цели, ошибки счётно-решающего прибора, ошибки следящего привода, управляющего направлением луча. Следствием указанных факторов являются хаотические колебания радиолуча относительно истинного направления на цель. В структурной схеме контура направления флуктуации радиолуча отражаются в виде помехи $n(t)_u$ со спектральной плотностью $G(\omega)_u$, приложенной на входе контура. Средняя квадратическая ошибка управления по курсу, обусловленная флуктуациями радиолуча, в соответствии со структурой контура (рис.12) имеет вид:

$$\sigma_{\alpha\lambda\lambda/m} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)_m \left| \frac{\mu_x k_{\text{ИВ}} \cos \beta_x \cos \eta_x \Phi(j\omega)_\Sigma}{1 + \mu_x k_{\text{ИВ}} \cos \beta_x \cos \eta_x \Phi(j\omega)_\Sigma} \right|^2 d\omega \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

Вводя эффективную полосу пропускания контура

$$\Delta F_\gamma = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\mu_x k_{\text{ИВ}} \cos \beta_x \cos \eta_x \Phi(j\omega)_\Sigma}{1 + \mu_x k_{\text{ИВ}} \cos \beta_x \cos \eta_x \Phi(j\omega)_\Sigma} \right|^2 d\omega \quad (5)$$

и заменяя в пределах эффективной полосы контура спектральную плотность $G(\omega)_m$, получаем:

$$\sigma_{\alpha\lambda\lambda/m} = \sqrt{G(0)_m \Delta F_\gamma}. \quad (6)$$

Второй является ошибка, обусловленная воздействием помех на радиолинию управления. В структурной схеме контура эти помехи отражаются в виде шумов $n(t)_m$ перед инерционной частью радиозвена. Средняя квадратическая ошибка управления по курсу, обусловленная помехами в радиолинии управления:

$$\sigma_{\alpha\lambda\lambda/m} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)_m \left| \frac{\Phi(j\omega)_\Sigma}{1 + \mu_x k_{\text{ИВ}} \cos \beta_x \cos \eta_x \Phi(j\omega)_\Sigma} \right|^2 d\omega \right\}^{1/2}. \quad (7)$$

Осуществляя в пределах эффективной полосы контура эквивалентную замену $G(\omega)_m \equiv G(0)_m$, получаем:

$$\sigma_{\alpha\lambda\lambda/m} = \frac{1}{k_{\text{БИ}}} \sqrt{G(0)_m \Delta F_\gamma}, \quad (8)$$

где $k_{\text{БИ}} = \mu_x k_{\text{ИВ}} \cos \beta_x \cos \eta_x$.

На рис.13 показан контур управления с приложенными к нему возмущающими воздействиями, при этом безынерционные элементы контура объединены в единое звено, а инерционные элементы контура – в звено $\Phi(p)_\Sigma$.

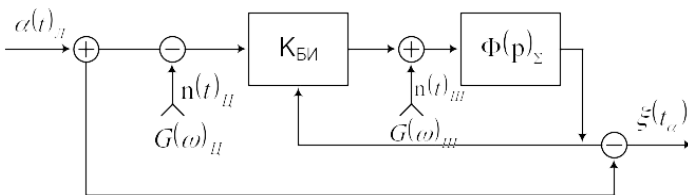


Рис. 13. Обобщенная схема контура управления по курсу с приложенными возмущающими воздействиями

Третья ошибка управления – динамическая. Для её оценки считают, что полезное воздействие на контур $\alpha(t)_z$, обусловленное маневром цели, является стационарным процессом со спектральной плотностью $G(\omega)_{\text{цел}}$. Тогда среднеквадратическая величина динамической ошибки управления

$$\sigma_{\text{дина}} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)_{\text{цел}} \left[|\Phi(j\omega)_z|^2 + 1 - 2k_{\text{ин}} \operatorname{Re} F_a(j\omega) \right] d\omega \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

Четвёртый вид ошибки обусловлен скручиванием [1,2] координат за счёт неодинаковых знаков движения плоскости $O_d Y_d Z_d$ системы координат луча и плоскости $O_c Y_c Z_c$ исполнительной системы координат ЛА. При этом угол скручивания

$$\gamma = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \sin(\eta) d\alpha, \quad (10)$$

где α_0 – азимут луча в момент старта; α – азимут луча для текущего момента; η – угол места луча для текущего момента.

Аппаратурными факторами, приводящими к скручиванию координат, могут явиться расстройки фильтра сигнала ошибки относительно частоты сканирования радиолуча [1].

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

В системе SestemView созданы файлы Радиолуч.svu и Радиолуч2.svu, содержащие схему, имитирующую работу системы радиоуправления в радиолуче. Модель позволяет посмотреть осциллограммы в контрольных точках, снять дискриминаторные характеристики фазовых детекторов при различных значениях глубины амплитудной модуляции входного сигнала приемника, оценить точность передачи команд в радиолинии, оценить последствия расстройки фильтра сигнала ошибки относительно частоты сканирования, исследовать влияние аддитивного и мультипликативного шумов на работу системы. Структурная схема имитатора приведена на рис. 14.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Запустить систему SystemView и вызвать файл Радиолуч.svu.

2. Провести временной анализ устройства, для чего:

- нажать на кнопку системного времени (System Time) на панели инструментов;
- в окне Stop Time установить время анализа 0,1 с и нажать ОК;
- нажать кнопку ► основного меню.

Зарисовать все приведенные осциллограммы. Номер каждой осциллограммы (например, Sink 5) соответствует номеру блока отображения данных (например, 5). Чтобы определить название устройства, к которому подключен блок отображения данных, достаточно подвести курсор к нужному блоку. Всплывающая подсказка содержит название устройства и его основные характеристики.

3. Снять дискриминационные характеристики фазовых детекторов при трех значениях (максимальном, среднем и минимальном) АМ входного сигнала приемника (фазу менять от 0 до 360° через 45°), для чего:

- по изложенной выше методике установить время анализа, равное 1 с;
- двойным нажатием левой кнопки мыши открыть метасистему 17 (Радиотракт);
- дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на значке источника синусоидального сигнала;
- нажатием кнопки Parameters вызвать окно установки параметров;
- установить значение амплитуды (Amplitude), равное 0,5 В (для второй и третьей характеристик – 0,25В; 0 В);
- установить первое значение фазы (Phase), равное нулю, и нажать ОК;
- нажать кнопку ►;

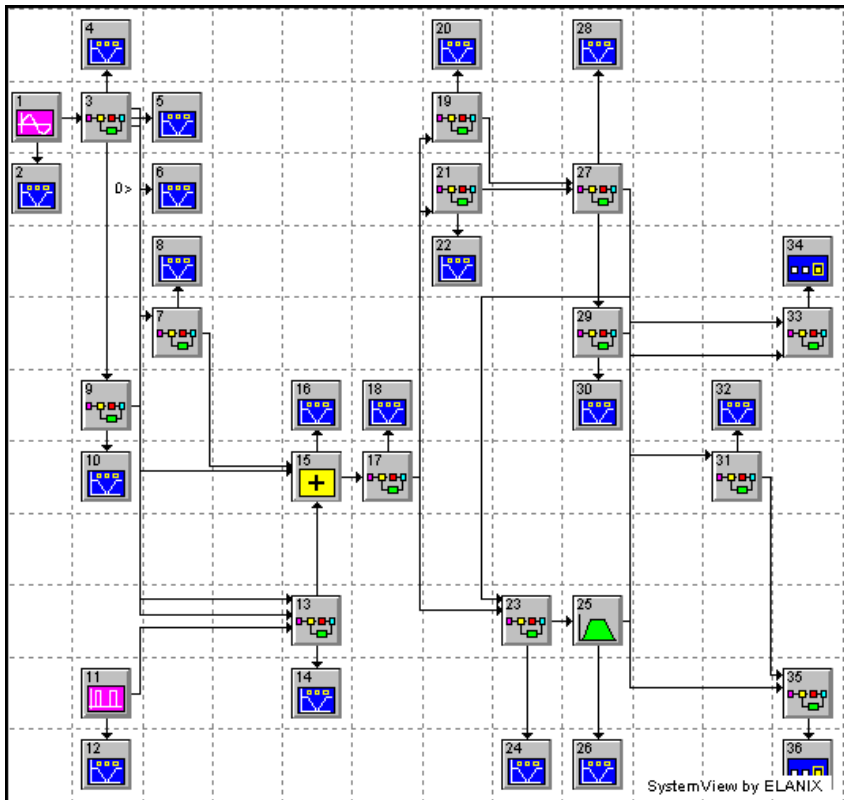


Рис. 14. Структурная схема имитатора системы радиуправления в радиолуче:

1 – генератор синусоидального напряжения с частотой $\Omega_{\text{ср}}$; 3 – переключатель кодирующих устройств; 7 – кодирующее устройство 1; 9 – кодирующее устройство 2; 11 – генератор тактовых импульсов; 13 – ключ и линия задержки; 15 – сумматор; 17 – радиотракт; 19, 21 – декодирующие устройства тактовых ИВК; 23 – детектор сигнала ошибки; 25 – фильтр сигнала ошибки; 27 – триггер; 29 – генератор стробирующих импульсов; 31 – фазовращатель; 33, 35 – фазовые детекторы; 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36 – устройства отображения информации

-записать в таблицу значения фазы, командного напряжения тангажа $U_{\text{кт}}$ и $U_{\text{кк}}$ (значения командных напряжений отображают устройства Sink 34 и Sink 36);

- изменить значение фазы и повторить изложенные выше операции.

4. Оценить влияние аддитивного шума на работу системы управления, для чего:

- двойным нажатием левой кнопки мыши открыть метасистему 17 (Радиотракт);

- дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на блоке 220 (источник гауссовского шума);

- нажатием кнопки Parameters вызвать окно установки параметров;

- установить значение $U_{\text{ш}}$ (Std Deviation), равное 2, и нажать ОК;

- по методике, изложенной в п. 3, снять дискриминационные характеристики для каналов тангажа и курса;

- снять зависимости $U_{\text{к}} = f(\varphi)$ для значения $U_{\text{ш}}$, равного 4.

5. Для канала тангажа снять дискриминационную характеристику для значения $U_{\text{ш}}$, равного 4, при накоплении 10 реализаций, для чего:

- нажать на кнопку системного времени (System Time) на панели инструментов;

- в графе No. of System Loops установить количество запусков системы, равное 10, и нажать ОК;

- дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на блоке 34;

- нажать кнопку Statistics и нажать ОК;

- по методике, изложенной в п. 3, снять зависимость $\langle U_{\text{кт}} \rangle = f(\varphi)$ для канала тангажа при максимальном значении АМ входного сигнала приемника Amplitude = 0,5 В (среднее значение командного напряжения $\langle U_{\text{кт}} \rangle$ взять из графы Mean); записать значение дисперсии (графа Variance);

- установить прежнее количество запусков системы (в графе No. of System Loops установить 1).

6. Установить значение $U_{\text{ш}}$ (Std Deviation), равное 0.

Изменить частоту настройки фильтра сигнала ошибки (блок 25), для чего:

- установить курсор на блоке 25;

- двойным нажатием левой кнопки мыши вызвать контекстное меню;

- нажатием кнопки Parameters вызвать ОКНО установки параметров;

- нажать кнопку Analog ;

- в окне Low Cutoff установить значение 14 Гц, в окне Hi Cutoff – 16 Гц и нажать ОК.

Снять дискриминационные характеристики по методике, изложенной в п. 3 при максимальной АМ входного сигнала приемника.

7. Оценить влияние мультипликативного шума на работу системы управления, для чего:

- открыть файл Радиолуч2.svu;
- снять дискриминационные характеристики по методике, изложенной в пп. 4 и 5.

8. Полученные зависимости представить в следующем виде:

- рисунок 1: зависимости, полученные в п. 3;
- рисунки 2 и 3: зависимости, полученные в п. 4 (для разных значений $U_{ш}$);
- рисунки 4 и 5: зависимости, полученные в п. 7 (для разных значений $U_{ш}$ без накопления);
- рисунок 6: зависимости, полученные в пп. 5, 7 (с накоплением), для сравнения изобразить соответствующий график, полученный в п. 3 (для канала тангажа при максимальном значении АМ входного сигнала приемника);
- рисунок 7: зависимости, полученные в п. 6.

9. Объяснить полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принципы действия системы управления в луче.

2. Контур управления по курсу и тангажу.

3. Источники ошибок системы управления в луче.

4. Что понимается под эффективной полосой контура управления?

5. Почему эффективную полосу контура необходимо оптимизировать?

6. Как влияют параметры ФСО на работу системы наведения?

7. Как выбираются основные параметры системы наведения?

8. Влияние шума на работу системы наведения.

9. На какую частоту настроен фильтр сигнала ошибки?

10. Воздействие сигнала и шума на фазовые детекторы.

11. Как выбирается частота сканирования диаграммы направленности антенны?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы радиоуправления / под ред. В.А. Вейцеля и В.Н. Типугина. М.: Сов. радио, 1995. 328 с.
2. Вейцель В.А., Типугин В.Н. Радиоуправление. М.: Сов. Радио, 1973. 408 с.
3. Моргунов А.Н. Системы радиотеленаведения. Рязань, РРТИ, 1978. 63 с.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Во избежание поражения электрическим током каждый студент при выполнении лабораторной работы обязан соблюдать следующие меры предосторожности.

1. Перед включением установки убедиться, что все межблочные соединения не нарушены.
2. При включении и выключении рубильников не касаться заземленных предметов, а также батарей центрального отопления.
3. Не оставлять без наблюдения лабораторную установку, находящуюся под напряжением.
4. В случае неисправности аппаратуры немедленно выключить рубильник питания аппаратуры и сообщить об этом преподавателю.
5. Окончив работу, выключить все блоки и привести в порядок рабочее место.

УДК 621.396

Системы радиопреуправления: методические указания к лабораторным работам № 3, 4/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т: сост. В.С.Паршин, М.В. Кулакова Рязань, 2014. 32 с.

Изложены особенности построения и выбор основных параметров командной радиопреуправления ШИМ-ЧМ-АМ (работа № 3) и системы управления в радиопреуправлении (работа № 4).

Предназначены для студентов 5-го курса специальности 210601 и бакалавров 4 курса направления 210400 факультета радиотехники и телекоммуникаций.

Ил. 24. Библиогр.: 4 назв.

Радиопреуправление, равносигнальная зона, радиопреуправление, контур управления, диаграмма направленности, разовая команда

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра радиопреуправления и связи Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой С.Н.Кириллов)

Системы радиопреуправления

Составители: Паршин Валерий Степанович
Кулакова Марина Васильевна

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.05.14. Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

4805

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СИСТЕМЫ РАДИОУПРАВЛЕНИЯ

Методические указания к лабораторным работам № 3, 4

Рязань 2014

Оператор ЭДО ООО "Компания "Тензор"

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

СОГЛАСОВАНО

ФГБОУ ВО "РГРТУ", РГРТУ, Дмитриев Владимир
Тимурович, Заведующий кафедрой РУС

02.07.25 15:28 (MSK)

Простая подпись