

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)

«Методы и устройства синхронизации в радиосистемах передачи информации»

Направление подготовки

11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Направленность (профиль) подготовки

Радиосистемы и комплексы управления

Уровень подготовки специалитет

Программа подготовки специалитет

Квалификация выпускника – инженер Форма обучения – очная

Рязань 2025

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

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: Паршин Валерий Степанович
Кулакова Марина Васильевна

Редактор М.Е. Цветкова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 13.06.19. Формат бумаги 60х84 1/16.

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

Тираж 50 экз. Заказ 3637.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

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 трехступенчатými видами модуляции (КИМ-ЧИМ-ФМ, КИМ-ФМ-ФМ, КИМ-ЧИМ-ФМ и др.) сигналом КИМ модулируют

ется 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 соседствующих радиопомех. 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:

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

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

Общий вид спектра изображен на рис. 1.

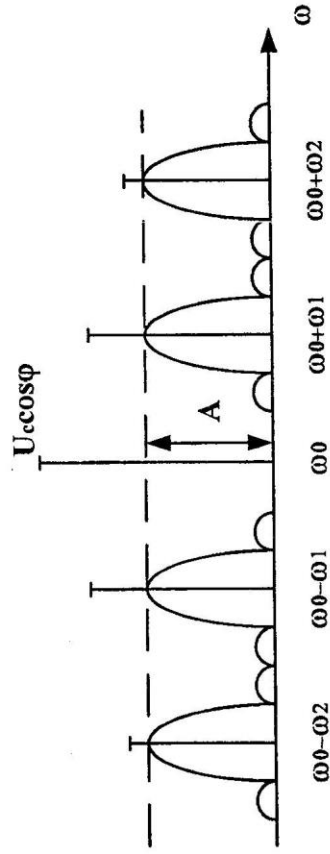


Рис. 1. Спектр сигнала КИМ-ЧИМ-ФМ

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

$$A = \frac{8}{\pi} U_0^2 \sin^2 \varphi P(1) [1 - P(1)] \tau_0,$$

где φ — девиация на последней ступени модуляции; $P(1)$ — 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).

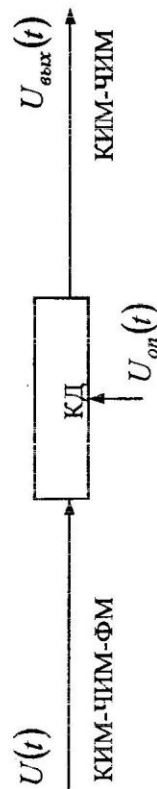


Рис. 2. Упрощенная схема демодулятора КИМ-ЧИМ-ФМ

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

Для получения опорного напряжения $U_{оп}(t)$ 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:

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

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 $P_{ом}$. 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.

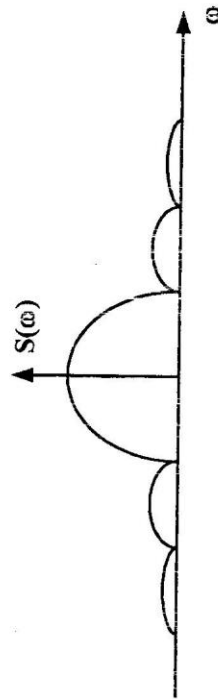


Рис. 3. Спектр сигнала КИМ-ФМ

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 потребуются меньше энергии.

Для сигнала КИМ-ФМ дисперсия фазы опорного напряжения равна

$$\sigma_{\varphi_1}^2 = \frac{N_0 \Delta f_m}{P_{c1} \cos^2 \varphi_1} + \frac{tg^2 \varphi_1 \Delta f_m \tau_0}{2}$$

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

$$\sigma_{\varphi_2}^2 = \frac{N_0 \Delta f_m}{P_{c2} \cos^2 \varphi_2}$$

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

$$P_{om1} = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}} \sin^2 \varphi_1 \right) \right],$$

а в радиолинии КИМ-ЧИМ-ФМ вероятность ошибки равна

$$P_{om2} = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}} \sin^2 \varphi_2 \right) \right],$$

где E – энергия сигнала; Φ – интеграл вероятности.

Отметим, что при идеально работающем когерентном детекторе и при работе с подавленной несущей ($\varphi = \pi/2$) сигнал КИМ-ФМ требует при условии $P_{om1} = P_{om2}$ вдвое меньшей энергии сигнала.

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

$$\frac{h_{01}}{h_{02}} = \left(1 + \frac{a_1}{2} \right) [1 + (1 + a_1) \sin^2 \varphi_1],$$

где h_0 – отношение сигнал/шум; $a_1 = h_{01} \sin^2 \varphi_1$.

Анализ полученного выражения позволяет установить, что уже при девиации фазы $\varphi > 45^\circ$ 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 $\Delta f_m \tau_0$. Но это далеко не все-

гда возможно. Уменьшение Δf_m 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.

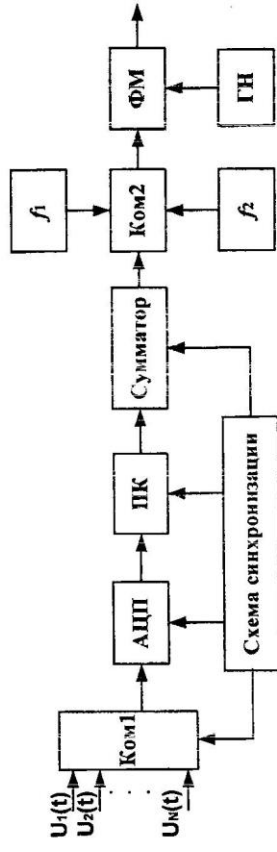


Рис. 4. Структурная схема передающей части радиолинии КИМ-ЧИМ-ФМ: Ком1 и Ком2 – коммутаторы; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – преобразователь кода; f_1 и f_2 – генераторы поднесущих; ФМ – фазовый модулятор; ГН – генератор несущей

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 неперiodическую 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 $N=7$.

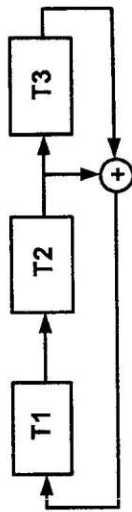


Рис. 5. Формирование М-последовательности

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: 01100101110010110... 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).

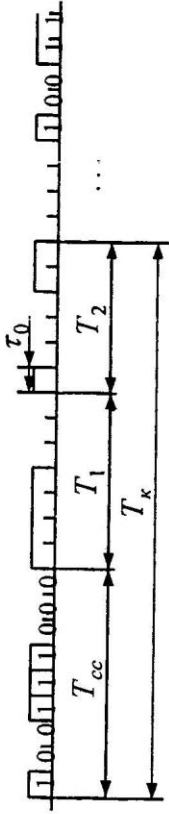


Рис. 6. Структура группового сигнала на выходе сумматора:

T_{cc} — длительность слова синхронизации;

T_1 или T_2 — длительность информационного слова;

T_0 — длительность элементарного символа;

T_k — длительность кадра

С помощью коммутатора Ком2 символ «1» заполняется меандром с частотой f_1 , а символ «0» — меандром с частотой f_2 . Сигнал на несущей модулирует по фазе колебание на несущей частоте ω_0 .

Структурная схема приемной части радиолинии изображена на рис. 7. На нем обозначено: ВЧ — высокочастотная часть приемника; ФД — фазовый детектор; ФОН — формирователь опорного напряжения; ПФ1, ПФ2 — полосовые фильтры; АД1, АД2 — амплитудные детекторы; ВУ1, ВУ2 — видеоусилители; (-) — вычитающее устройство; РУ — решающее устройство; Ф1, Ф2, Ф3 — формирователи; РФ — резонансный фильтр; УДВ — удвоитель частоты; УРФ — узкополосный резонансный фильтр; МТГ — местный тактовый генератор; ФНЧ — фильтр нижних частот; РК — распределитель каналов; Дш — дешифратор; СФ — согласованный фильтр; ЦФД — цифровой фазовый детектор; МГ — местный генератор.

В высокочастотной части происходит перенос несущей частоты на промежуточную. Формирователь опорного напряжения ФОН выполняется на основе следающего фильтра. Полосовые фильтры ПФ1 и ПФ2 настроены на поднесущие частоты f_1 и f_2 .

На выходе схемы разности формируется групповой сигнал, искаженный шумами. С помощью решающего устройства РУ происходит определение принятого символа. Решающее правило имеет вид:

$$\text{если } U_x > 0, \text{ то } U_x = 1;$$

$$\text{если } U_x < 0, \text{ то } U_x = 0,$$

где U_x — напряжение с выхода вычитающего устройства.

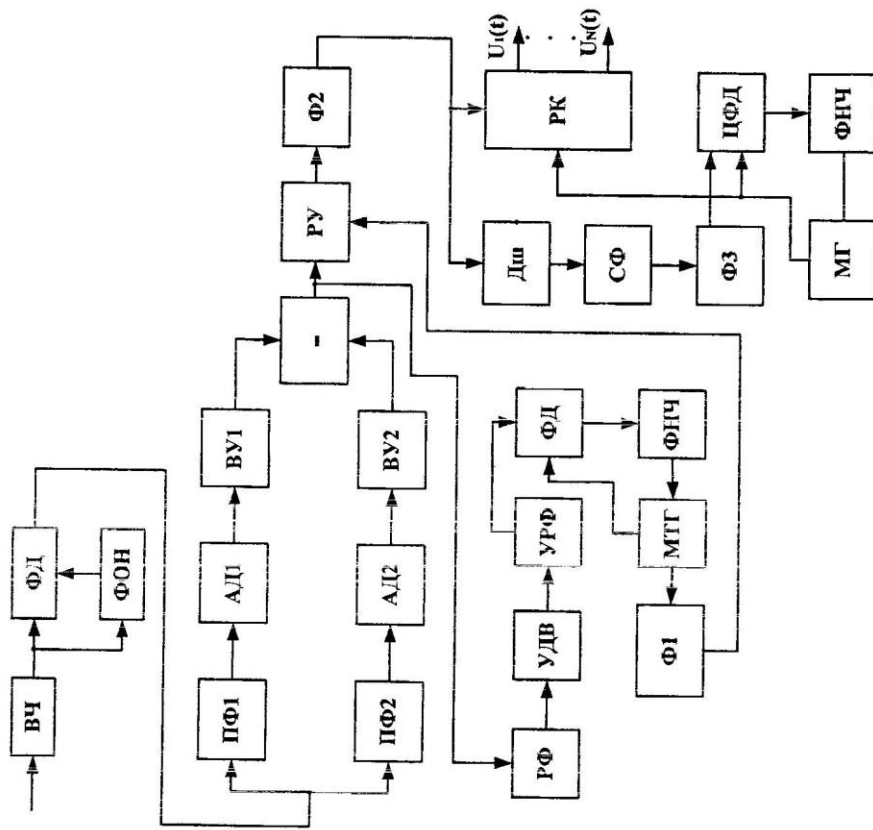


Рис. 7. Структурная схема приемной части радиолинии КИМ-ЧМ-ФМ

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 ко-

мандном 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 Ф3, 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. Ознакомьтесь с порядком выполнения работы, выведенным на монитор.
2. Введите «1» (номер выполняемого пункта). Зарисуйте оциллограммы и спектры в характерных точках передатчика, соблюдая очередность контрольных точек. Аналогично исследуйте работу приемника.
3. Введите «2». Постройте зависимость мощности переходных помех от разности частот, используя данные таблицы. Сделайте вывод о выборе оптимального разности 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 послеправная синхронизация в приемнике?
7. Как организована позадравая синхронизация в приемнике?
8. Как организована посылвольная 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 радиоуправления/ под ред. В.А. Вейцеля. М.: Радио и связь, 1995. 327 с.