

УДК 621.391

А.С. КОЛОМИЕЦ¹, А.С. ЖУЧЕНКО², А.П. БАРДА³¹ *Полтавский военный институт связи, Украина*² *Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина*³ *Национальная академия обороны Украины, Украина*

СИНХРОНИЗАЦИЯ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

Рассмотрены задачи и требования, предъявляемые к системе синхронизации. Рассматриваются некоторые из наиболее часто используемых вариантов системы синхронизации в режиме псевдослучайной перестройки рабочей частоты.

синхронизация, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, системы радиосвязи, вероятность приема ложного сигнала, вероятность правильного обнаружения сигнала

Введение

Постановка задачи и анализ публикаций.

Прием и обработка широкополосных сигналов, включая сигналы, спектр которых расширяется методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), требуют точной синхронизации между опорной псевдослучайной последовательностью приемника и передаваемой. Только в случае, когда параметры принимаемого сигнала, в том числе и его запаздывание по времени, известны в точке приема, возможна эффективная работа приемного устройства системы радиосвязи (СРС). В реальных условиях по целому ряду причин (нестабильность генераторов в передатчике и приемнике, задержка сигнала при распространении от передатчика до приемника и др.) точный момент прихода сигнала на вход приемника неизвестен. Неизвестной в точке приема может быть и частота принимаемого сигнала, в основном по причине ее доплеровского смещения. При дальнейшем рассмотрении вопросов синхронизации частотное смещение не учитывается, а рассматривается только синхронизация по времени [1]. В этом случае на приемной стороне должны быть приняты меры по совмещению во времени опорной и приходящей последовательности и поддержанию

этого состояния во время передачи сообщения.

Система синхронизации в режиме ППРЧ выполняет следующие задачи: первоначальную синхронизацию всех радиостанций СРС; текущую синхронизацию радиостанций в процессе обмена информацией; ввод в любое время в синхронизм с радиосетью радиостанции, по каким-либо причинам выпавшей из синхронизма; вхождение в синхронную радиосеть новых радиостанций. Исходя из этих задач, к системе синхронизации предъявляются следующие требования: процесс синхронизации должен быть автоматическим и занимать минимальное время; синхронизация должна обеспечиваться при предельно низких значениях сигнала на входе приемника; синхронизация должна сохраняться в течение длительных промежутков времени за счет местных источников синхронизации (при неприеме отдельных или нескольких кодограмм синхронизации, в режиме радиомолчания т.д.); кодограммы синхронизации должны быть защищены от преднамеренных, случайных радиопомех; кодограммы синхронизации (по форме, положению в информационном потоке) должны быть неразличимы для радиоразведки противника; система синхронизации не должна требовать «метки» истинного времени перед вхождением в синхронизм.

Рассмотрим некоторые из наиболее часто используемых вариантов синхронизации:

1. Общая синхронизация всех радиостанций системы радиосвязи в режиме абсолютного времени, со стабильностью частоты опорных генераторов порядка $10^{-10} - 10^{-11}$.

2. Общая синхронизация всех радиостанций системы радиосвязи по сигналам специальной центральной радиостанции.

3. Локальная (местная) синхронизация радиостанций радиосети по сигналам старшей радиостанции сети.

4. Локальная (местная) синхронизация радиостанций радиосети по сигналам радиостанции, ведущей в данный момент передачу информации.

Первые два варианта синхронизации требуют наличия опорных генераторов с высокой стабильностью частоты и периодического, достаточно частого излучения центральной станцией системы специальных сигналов синхронизации, а также имеют большие непроизводительные потери времени на каждой частоте. Это обусловлено тем, что из времени, отводимого на работу на каждой частоте необходимо исключить время распространения сигнала в радиоканале между наиболее удаленными абонентами радиосети.

Скорость переключения частотных элементов $R_{ск}$ является функцией скорости передачи данных от источника информации R_0 , и связана с этой скоростью и скоростью передачи символов R_i соотношением вида [1]:

$$R_{ск} = R_i - R_0. \quad (1)$$

Это обстоятельство накладывает дополнительные реальные ограничения на скорость переключения частотных элементов $R_{ск}$ или требует существенного увеличения скорости передачи в радиоканале R_0 .

Третий вариант синхронизации не требует специальных центральных радиостанций синхронизации и чрезмерно высокой стабильности опорных

генераторов в радиостанциях. Однако при этом велики непроизводительные расходы времени на распространение сигнала в радиоканале.

Наиболее приемлемым для системы радиосвязи является 4-й вариант синхронизации радиосетей по сигналам своих радиостанций, ведущих в данный момент передачу информации. При этом варианте не нужна централизованная синхронизация, отсутствуют чрезмерные требования к стабильности опорных генераторов, потери времени на распространение сигналов исключаются.

Поэтому **целью работы** есть рассмотрение варианта синхронизации СРС с ППРЧ по сигналам радиостанции, ведущей в данный момент передачу информации.

В приемнике СРС с ППРЧ устранение скачков частоты сигнала выполняется путем перемножения принятого сигнала на опорный сигнал приемника. В результате формируется функция корреляции двух сигналов, но так как момент прихода сигнала на вход приемника точно неизвестен, то образуемая на выходе коррелятора сигналов с ППРЧ взаимокорреляционная функция может иметь малую величину. Задача системы синхронизации заключается в максимизации этой функции, что достигается в случае, когда принимаемая и опорная последовательности ППРЧ достаточно точно совмещаются во времени. Очевидный путь решения этой задачи: сначала обнаружить каким-либо образом принятый сигнал, а затем совместить его с опорным. Такой путь является в большинстве случаев практически нереализуемым, так как обнаружить в общем случае слабый сигнал на фоне шумов, не зная точного положения во времени программы его перестройки, не представляется возможным. Таким образом, требуется осуществить обнаружение с одновременным измерением времени задержки сигналов. При этом априорная неопределенность значения задержки может превышать ширину пика ПВКФ. Отсюда следует, что на первом этапе синхронизации требуется уста-

новить положение главного пика ПВКФ, т.е. обнаружить сигнал и оценить значение задержки. На втором этапе необходимо не потерять синхронизм, поэтому требуется поддержание максимально близкого совпадения опорной и приходящей программ перестройки частоты и выравнивание тактовых час-

тот. Для обеспечения уверенности в том, что близкое совпадение программ поддерживается, необходим специальный режим – режим подстройки. Обобщенная структурная схема подсистемы синхронизации представлена на рис. 1.

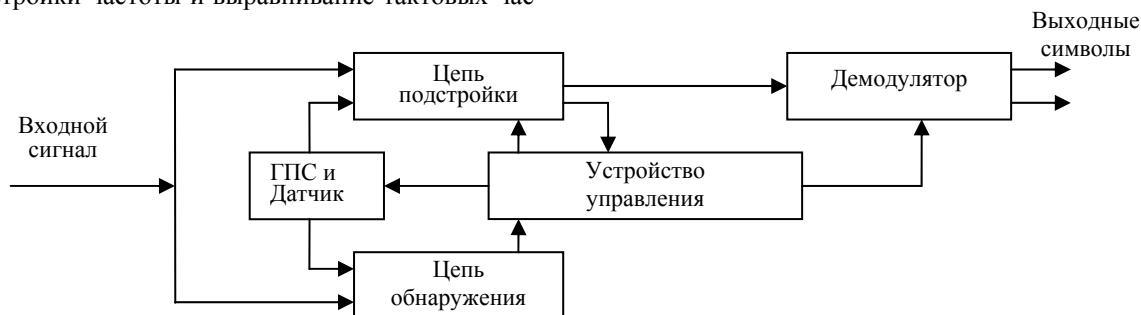


Рис. 1. Обобщенная структурная схема подсистемы синхронизации

Более конкретная схема в значительной степени определяется тем, какой метод синхронизации выбран.

На этапе первоначальной синхронизации систем связи с ППРЧ может использоваться метод параллельного поиска рис. 2.

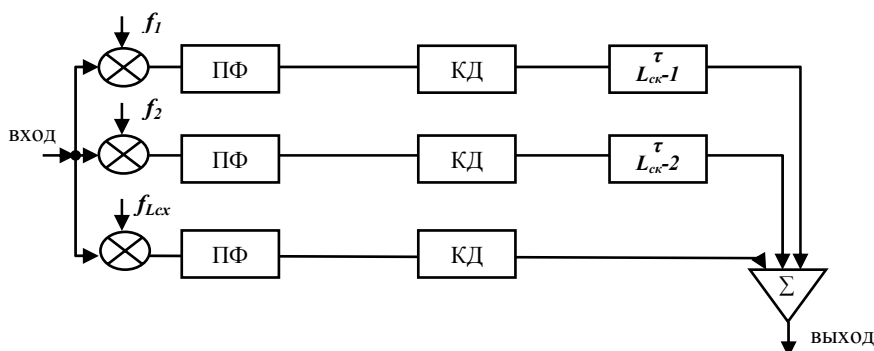


Рис. 2. Процесс параллельного поиска для систем связи с ППРЧ

Здесь в качестве шаблона синхронизации (без модуляции данных) используется последовательность из L_{ck} частот, являющиеся частью последовательности скачков L . Для первичной обработки полученного сигнала применяется L_{ck} некогерентных согласованных фильтров (ПФ), каждый из которых состоит из смесителя частот, полосового фильтра и квадратурного детектора огибающей (КД). Если процесс ППРЧ можно описать последовательностью частот с 1 по L_{ck} , времена задержки фильтров подбираются таким образом, что при появлении искомой комбинации система дает выходной сигнал зна-

чительной мощности, который и указывает на детектирование нужной последовательности. Если в течение каждого процесса определения корреляции обрабатываются N элементарных сигналов длительностью T_c каждый, максимальное время полного параллельного поиска можно записать в следующем виде[1]:

$$T_{поиска\ max} = NT_c . \quad (2)$$

Среднее время поиска будет зависеть от P_{no} – вероятности правильного обнаружения:

$$T_{поиска\ ср} = NT_c / P_{no} . \quad (3)$$

Предполагая, что число интервалов неопреде-

ленности при поиске сигнала по задержке равно базе сигнала, запишем выражение, связывающее вероятности приема ложного сигнала $P_{лс}$ и вероятности правильного обнаружения сигнала $P_{но}$ с соответствующими вероятностями $P_{лс1}$ и $P_{но1}$ на одном интервале неопределенности [2]:

$$\begin{aligned} P_{лс} &= 1 - (1 - P_{лс1})^L, \\ P_{но} &= 1 - (1 - P_{лс1})^{L-1} (1 - P_{но1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Вероятность приема ложного сигнала на одном интервале неопределенности, согласно [3], определяется выражением

$$P_{лс1} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Gamma(B)}{\Gamma(B-0,5)} \cdot \Theta \left(r_0 \sqrt{\frac{B_2}{B_0}} \right), \quad (5)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма функция; $B = 0,5 B_2$; $\Theta(x)$ – интегральная функция, $\Theta(x) = \int (B_0 + B_2 t^2)^{-B} dt$;

$$B_0 = \frac{2\mu_4}{5\mu_4 - 9} = \frac{2(\gamma + 3)}{5\gamma + 6}; \quad B_2 = \frac{\mu_4 - 3}{5\mu_4 - 9} = \frac{\gamma}{5\gamma + 6};$$

$$r_0 = \frac{H\sqrt{L}}{k\sqrt{P_n}}; \quad P_n - \text{мощность помехи}; \quad k - \text{коэффициент}$$

пропорциональности; H – величина порога.

Подставляя выражение (4) в (5), получим выра-

жение для вероятности приема ложного сигнала при действии на обнаружитель структурной помехи

$$P_{лс} = 1 - \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Gamma(B)}{\Gamma(B-0,5)} \cdot \Theta \left(r_0 \sqrt{\frac{B_2}{B_0}} \right) \right)^L. \quad (6)$$

Используя выражение (6) и исходя из заданной вероятности приема ложного сигнала, аналогично можно определить величину нормированного порога r_0 и построить зависимости величины порога от отношения мощностей помехи и сигнала для различных значений априорных вероятностей P_i попадания преднамеренной помехи в разрешенный в данный момент времени частотный диапазон.

Основным недостатком такого метода синхронизации есть сложная техническая реализация при быстрой синхронизации. Вместо схемы рис. 2 может быть использован единичный коррелятор и согласованный фильтр, производящий последовательный поиск. Последовательное повторение процедуры позволяет значительно снизить сложность и стоимость системы, но тем самым увеличивается время синхронизации (рис. 3).

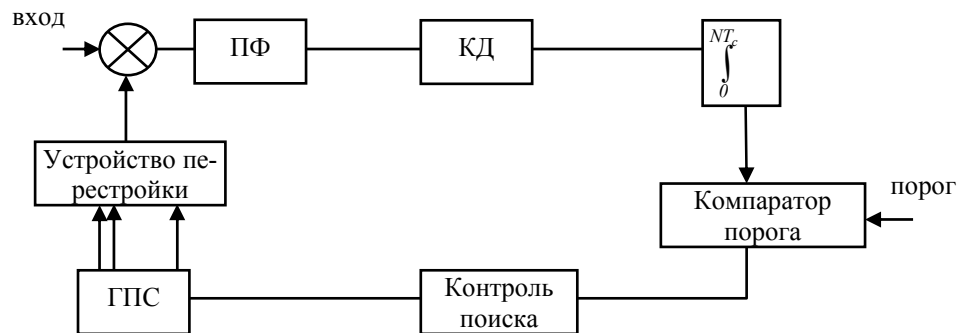


Рис. 3. Процесс последовательного поиска для систем связи с ППРЧ

Максимальное время синхронизации для такого метода будет таким [1]:

$$T_{поиска\ max} = L_{сх} NT_c. \quad (7)$$

После окончания первоначальной синхронизации система переходит ко второму этапу – удержанию и обработке. Здесь для достижения идеальной синхронизации используют некогерентные контуры сопровождения [1].

Как было сказано ранее, наиболее приемлемым для радиосвязи управления является способ синхронизации радиостанций радиосети по сигналам радиостанции, ведущей в данный момент передачу информации. Для этого необходимо в массиве частот, выделенных радиосети, иметь несколько частот, специально предназначенных для передачи кодограмм синхронизации, и каким-то образом расста-

вить эти частоты в последовательности рабочих частот, по которой осуществляются перескоки. Эти частоты и их места в псевдослучайной последовательности рабочих частот должны быть записаны в память радиостанций. В исходном состоянии (перед начальной синхронизацией) каждая радиостанция радиосети анализирует эти частоты, выбирает наилучшую и находится на ней в режиме дежурного приема.

Любая радиостанция радиосети, первой выходящая в эфир для передачи информации, осуществляет первоначальную синхронизацию всех радиостанций сети. Для этого она запускает всю систему синхронизации, начинает сканировать по частотам в соответствии с назначенной программой перескоков и первые 1–2 секунды на рабочих частотах, предназначенных для передачи информации, передает случайную двоичную последовательность, имитирующую информацию, а на частотах синхронизации передает кодограммы синхронизации. Остальные радиостанции принимают эти кодограммы, запускают с нужной позиции свои программы перескоков, входя таким образом в синхронизм.

Текущая подсинхронизация производится по сигналам каждой радиостанции, выходящей на передачу. Это необходимо, чтобы любая радиостанция радиосети, «выпавшая» по каким-либо причинам из синхронизма, или сторонняя радиостанция, которой разрешен вход в радиосеть (но которая делает это по мере необходимости) могла войти в синхронизм с радиосетью.

Частоты, специально выделенные для синхронизации, должны быть жестко привязаны к последовательности выделенного радиосети варианта программы перескоков. Это необходимо для того, чтобы любая входящая в синхронизм радиостанция «знала», с какого числа (номера) псевдослучайной последовательности ей нужно совершать последующие перескоки синхронно с остальными радиостанциями. Для этого на частотах синхронизации

радиостанция, ведущая передачу, должна передавать номер места этой частотно-временной позиции в последовательности перескоков. Как показывают расчеты [1], при средних скоростях перескоков (менее 400 ск/с) и периоде ПСП 28 часов, времени вполне достаточно, чтобы передать в двоичной форме не только этот номер, а также ввести избыточность для повышения помехоустойчивости синхрокодограммы и ее маскировки.

Выводы

Рассмотренный способ синхронизации является одним из возможных вариантов. Для решения вопросов о практическом использовании предложенных вариантов системы синхронизации и возможности реализации динамического режима функционирования необходимо использовать новые разработанные методы формирования сложных сигналов, часть которых является шаблоном для системы синхронизации при функционировании радиолиний управления.

Литература

1. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Э. Лимарев, Н.П. Мухин, В.И. Шестопалов. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
2. Пышкин И.М. Теория кодового разделения сигналов. – М.: Связь, 1980. – 208 с.
3. Стасев Ю.В., Коломиец А.С., Лаврут А.А. Оценка помехозащищенности декаметрового радиолинии при использовании сигналов с расширением спектра // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вип. 3 (19). – С. 158-162.

Поступила в редакцию 10.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.