

УДК 47.14.13

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ТРЕХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Муравьев В. В., Корневский С. А., Наумович Н. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены проблемы создания и методы построения измерительных комплексов трехмиллиметрового диапазона длин волн, позволяющих обеспечить высокую точность измерения частоты и мощности входного сигнала. Показана возможность и целесообразность использования синтезаторов частот в гетеродинном тракте субгармонических смесителей и логарифмических усилителей в модуляционном приемнике. Приведены экспериментальные параметры и характеристики основных узлов измерительного комплекса и его параметры.

Введение

В настоящее время идет стремительное развитие радиоэлектронных систем миллиметрового диапазона длин волн, в котором обеспечиваются большая скорость передачи цифровой информации, высокая точность определения координат при малых габаритах антенных устройств, высокая помехозащищенность систем, обусловленная трудностью обнаружения и постановки помех.

Для измерения параметров разрабатываемых устройств необходимо создание измерительных комплексов миллиметрового диапазона длин волн. Современные измерительные комплексы требуют обеспечения высокой точности измерения мощности и частоты входного сигнала, управления работой комплекса и отображения информации компьютером.

Проведенный анализ современного состояния развития элементной базы трехмиллиметрового диапазона длин волн показал, что в настоящее время в трехмиллиметровом диапазоне длин волн отсутствуют входные малошумящие усилители и твердотельные генераторы, соответствующие требованиям, предъявляемым к гетеродинам приемных устройств измерительных приемников. Важнейшими из этих требований являются:

- обеспечение большой полосы частот электронной перестройки гетеродина;
- обеспечение малого уровня амплитудных и фазовых шумов;
- высокая точность установления частоты

генерируемого сигнала;

- малые габариты, низкая стоимость, высокая надежность, возможность управления частотой генератора ПЭВМ измерительного комплекса.

В настоящей работе сделана попытка создать такой комплекс в трехмиллиметровом диапазоне длин волн, используя элементную базу более низких частот.

Схема построения и параметры измерительного комплекса

Важнейшими параметрами измерительного комплекса являются:

- минимальное значение мощности измеряемого сигнала;
- диапазон рабочих частот;
- погрешности измерения мощности и частоты входного сигнала;
- динамический диапазон входного сигнала.

Минимальное значение мощности измеряемого сигнала в значительной мере определяется полосой пропускания тракта УПЧ измерительного комплекса.

Для обоснования значения полосы пропускания УПЧ проведен анализ характеристик сигналов серийных генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн, которые могут быть использованы для формирования измеряемых сигналов.

Установлено, что полоса частот генерируемого сигнала, обусловленная долговремен-

ной и кратковременной нестабильностью частоты (df), может превышать 100 МГц.

Для обеспечения высокой точности измерения мощности сигналов полоса частот усилителя промежуточной частоты измерительного комплекса должна быть больше $2 df > 200$ МГц. Поэтому значение полосы пропускания УПЧ измерительного комплекса выбрано $df = 300$ МГц.

При этом мощность шумов, приведенная к входу идеального приемного устройства, равна:

$$D_{\text{ш}} = kT_0 df = 1.2 \cdot 10^{-11} \text{ Вт},$$

где k – постоянная Больцмана; T_0 – температура приемного устройства; df – полоса частот измерительного приемника.

В связи с отсутствием малошумящих усилителей в трехмиллиметровом диапазоне частот коэффициент шума приемного устройства определяется преобразователем частоты и имеет значение 6–7 дБ. Коэффициент шума субгармонического смесителя, работающего на восьмой гармонике частоты гетеродина, составит 16 – 17 дБ. Тогда предельная чувствительность приемника равна $(5-6)10^{-11}$ Вт, при использовании смесителя на основной гармонике частоты гетеродина и $(5-6) 10^{-10}$ Вт, для субгармонического смесителя.

Реальная чувствительность приемного устройства комплекса определяется точностью измерения мощности входного сигнала, потерями на входе, погрешностью калибровки и другими факторами.

Для обеспечения погрешности измерений мощности входного сигнала 0,5 дБ, значение мощности входного сигнала должно на 20 дБ превышать мощность собственных шумов приемного устройства.

В результате реальная чувствительность приемного устройства будет равна $(5-6)10^{-9}$ Вт и $(5-6)10^{-8}$ Вт для субгармонического смесителя.

Увеличение чувствительности измерительного комплекса может быть обеспечено следующим образом:

- применением схемы фазовой (частотной) автоподстройки частоты гетеродина для компенсации нестабильности входного сигнала и уменьшения полосы пропускания приемного устройства;

- использованием модуляционного метода приема сигнала.

В настоящее время имеются серийные микросхемы, позволяющие реализовать схемы ФАПЧ для непрерывного гармонического сигнала.

Для измерения мощности импульсных или широкополосных сигналов применение ФАПЧ затруднено, а большинстве случаев практически невозможно. Поэтому было принято решение использовать схему модуляционного измерительного приемника, приведенную на рисунке 1. Из рисунка видно, что на входе модуляционного приемника отсутствует амплитудный модулятор, что позволяет устранить влияние потерь в модуляторе (приблизительно 1,5 дБ) на значение коэффициента шума измерительного комплекса.

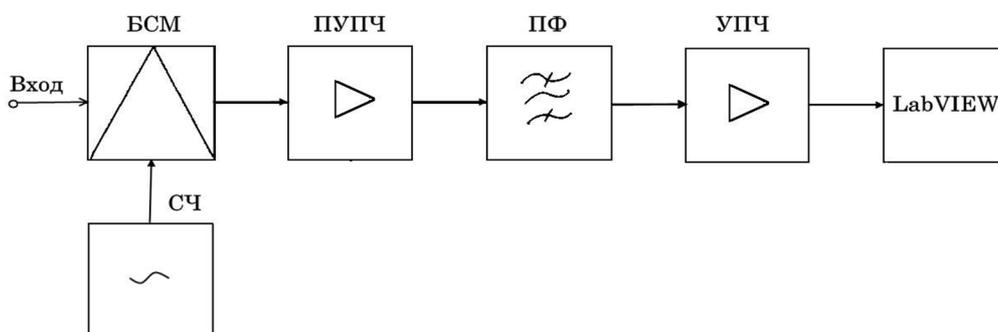


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного комплекса

Модуляция сигнала обеспечивается частотной манипуляцией сигнала синтезатора частот с частотой 1 кГц. Девияция частоты выбрана равной 250 МГц, что позволяет обеспечить изменение амплитуды измеряемого сигнала на выходе полосового фильтра на 20–25 дБ. При равномерной спектральной плотности шума смесителя в полосе частот 250 МГц, амплитудная модуляция шума на выходе преобразователя частоты отсутствует.

Одним из основных узлов измерительного комплекса является преобразователь частоты, работающий на восьмой гармонике частоты гетеродина. В качестве гетеродина использован синтезатор частот (СЧ), работающий в диапазоне частот 10,875–11,575 ГГц [1]. Высокая стабильность и малые шумы синтезатора частот позволяют не учитывать влияние шумов и нестабильности частоты СЧ на ухудшение чувствительности приемного устройства. Предварительный усилитель промежуточной частоты конструктивно совмещен со смесителем для уменьшения коэффициента шума преобразователя.

Логарифмический усилитель обеспечивают уменьшение динамического диапазона входного сигнала аналого-цифрового преобразователя среды LabVIEW, в которой обеспечиваются управление работой измерительного комплекса, обработка и отображение информации.

Структурная схема преобразователя частоты на восьмой гармонике приведена на рисунке 2, а внешний вид – на рисунке 3.

Измеряемый сигнал поступает на вход смесителя RF. На гетеродинный вход смесителя LO, поступает сигнал синтезатора частот 10,875–11,975 ГГц. Амплитудная модуляция входного измеряемого сигнала обеспечивается перестройкой частоты синтезатора частот. Частота перестройки частоты синтезатора частот 1 кГц, девияция частоты – 30 МГц. Время установления частоты выходного сигнала синтезатора – 200 мкс.

Для обеспечения стабильного значения мощности сигнала гетеродина на диодах смесителя усилитель мощности (УМ) работает в режиме насыщения.

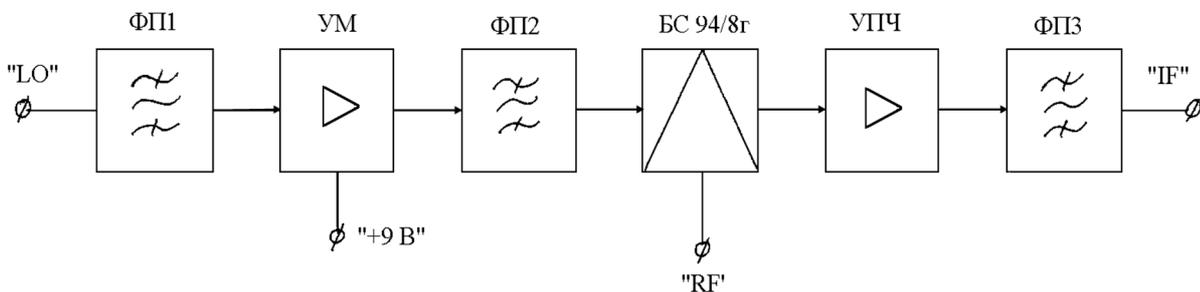


Рисунок 2 – Структурная схема преобразователя частоты на восьмой гармонике

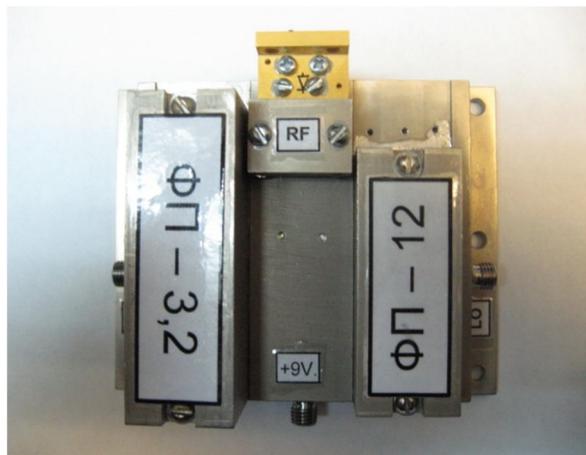


Рисунок 3 – Внешний вид преобразователя частоты

Полосовой фильтр ФП2 уменьшает мощность амплитудных и фазовых шумов гетеродина и обеспечивает развязку сигналов гетеродина и выходного сигнала промежуточной частоты. Выходной сигнал смесителя усиливается предварительным усилителем промежуточной частоты и через полосовой фильтр (ФП3) поступает на выход промежуточной частоты (IF). Полоса пропускания полосового фильтра составляет 300 МГц на промежуточной частоте 3,2 ГГц. Полосовой фильтр ФП3 и УПЧ обеспечивают суммарное значение коэффициента передачи 20 дБ. Измеренное значение коэффициента шума преобразователя частоты равно 16 дБ.

Динамический диапазон изменения мощности выходного сигнала модуляционного приемника всегда больше динамического диапазона изменения мощности входного сигнала. Это обусловлено тем, что при малых значениях отношения мощности измеряемого сигнала к мощности шума, отношение сигнал/шум на выходе детектора значительно уменьшается. Проведенные расчеты показали, что для обеспечения динамического диапазона измерительного модуляционного приемника 60 дБ при точности измерения мощности сигнала 0,5 дБ, динамический диапазон АЦП должен составлять 80–90 дБ. В измерительном комплексе обработка измеряемого сигнала, управление и отображение информации осуществляются в среде LabView [2]. Максимальный динамический диапазон АЦП 72 дБ. Поэтому в измерительном комплексе в качестве УПЧ используется логарифмический усилитель, выполненный на микросхеме AD8313. Микросхема обеспечивает работу в диапазоне частот до 7 ГГц при диапазоне амплитуд входного сигнала от 10^{-9} до 10^{-4} Вт. Использование логарифмического усилителя для измерения мощных сигналов в модуляционном приемнике невозможно. При подаче на вход логарифмического усилителя АМ сигнала, разность между максимальным и минимальным значениями сигнала не зависит от его амплитуды (мощности). Это приводит к постоянному значению амплитуды спектральной составляющей на частоте 1 кГц в выходном сигнале логарифмического усилителя, при любом значении мощности входного сигнала.

Модуляционный режим работы приемника необходим для измерения слабых сигналов, мощность которых может быть значительно

меньше собственных шумов приемника. В этом случае мы должны рассматривать зависимость $\log(U_s + U)$, где U_s – амплитуда шума, U – амплитуда сигнала. Измерение постоянной и переменной составляющих выходного сигнала детектора логарифмического усилителя позволяет однозначно определить значение измеряемой мощности.

При калибровке приемного устройства в память компьютера заносятся значения амплитуд постоянной составляющей на выходе детектора логарифмического усилителя и спектральной составляющей 1 кГц при различных значениях мощности входного сигнала для четырех различных рабочих частот. Для остальных частот значения амплитуд выходных сигналов логарифмического усилителя интерполируются разработанным программным обеспечением. На рисунке 4 показан синтезатор частот, обеспечивающий необходимый частотный диапазон и частотную манипуляцию сигнала с частотой 1 кГц.



Рисунок 4 – Синтезатор частот

Диапазон рабочих частот СЧ 8–12,5 ГГц. Генератор управляемый напряжением (ГУН) выполнен на микросхеме HMC588LC4. Для сравнения характеристик СЧ в указанном диапазоне частот проведена разработка синтезаторов частот с целочисленным (микросхема ADF4107) и дробным коэффициентами деления (микросхем ADF 4107 BRU) [1]. Спектр синтезатора частот при частотной манипуляции сигнала показан на рисунке 5.

Видно, что наличие частотной манипуляции не приводит к ухудшению частотных шумов синтезатора частот.

На рисунке 6 показан спектр разработанного синтезатора частот с дробным значением коэффициента деления.

Видно, что в спектре сигнала имеются спектральные составляющие частоты переключения, обусловленные формированием дробного коэффициента деления.

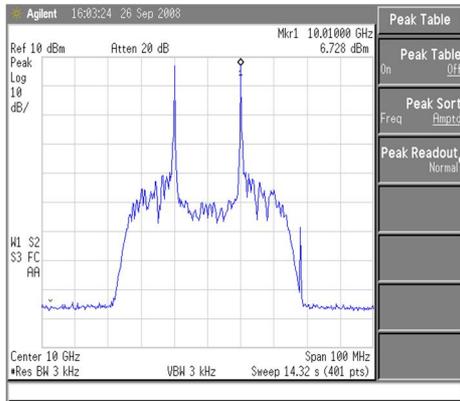


Рисунок 5 – Спектр сигнала синтезатора частот при частотной манипуляции

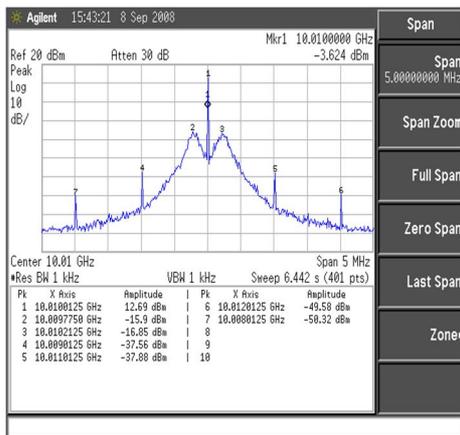


Рисунок 6 – Спектр выходного сигнала синтезатора частот при частотной манипуляции

При больших амплитудах входного сигнала эти спектральные составляющие могут усложнить алгоритм автоматической настройки на частоту принимаемого сигнала. На рисунках 6 и 7 показаны фазовые шумы синтезаторов частот с целочисленным и дробным коэффициентами деления.

Видно, что при больших отройках от несущей частоты различие фазовых шумов синтезаторов незначительно. Поэтому в измерительном комплексе целесообразно использовать СЧ с целочисленным значением коэффициента деления.

Программное обеспечение управления и отображения результатов измерения выполнено в среде LabVIEW [2].

Выходной сигнал логарифмического усилителя поступает на аналого-цифровой преобразователь.

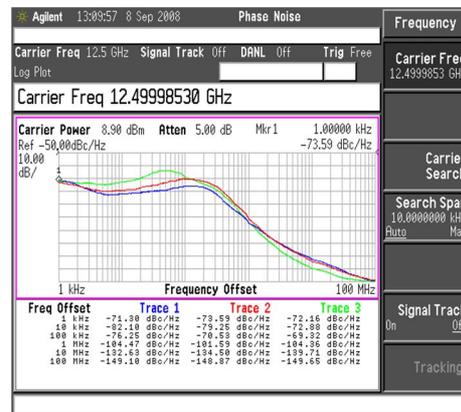


Рисунок 7 – Фазовые шумы синтезатора частоты с целочисленным коэффициентом деления

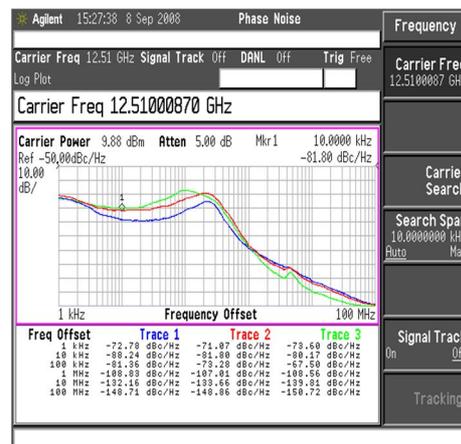


Рисунок 8 – Фазовые шумы синтезатора частоты с дробным коэффициентом деления

Далее с помощью быстрого преобразования Фурье определяются значения постоянной составляющей и спектральной составляющей 1 кГц при различных значениях времени накопления сигнала.

Управление работой синтезатора частот, автоматическая настройка на частоту измеряемого сигнала, измерение и отображение измеренных значений частоты и мощности осуществляются с помощью разработанного программного обеспечения.

Заключение

В статье приведены результаты разработки измерительного комплекса трехмиллиметро-

вого диапазона длин волн, который обеспечивает:

- диапазон рабочих частот 90–96 ГГц;
- поиск измеряемого сигнала по частоте;
- время настройки на частоту входного сигнала, менее 5 с;
- динамический диапазон мощностей входного сигнала -10^{-11} – 10^{-6} Вт;
- погрешность измерения амплитуды выходного сигнала – 0,5 дБ;
- погрешность измерения частоты входного сигнала менее 200 МГц.

Такой комплекс может быть использован при разработке различной радиоэлектронной аппаратуры трехмиллиметрового диапазона

длин волн и для проведения измерений параметров антенных устройств.

Список цитируемых источников

1. *Муравьев, В. В.* Широкополосный синтезатор частоты / В. В. Муравьев, А. В. Ворошень, С.А. Корневский [и др.]. – Материалы XIII Международной научно-технической конференции «Современные средства связи». – Минск, 2008.
2. *Федосов, В. П.* Цифровая обработка сигналов в LabVIEW / В. П. Федосов, А.К. Нестеренко; под ред. В.П. Федосова – М. : ДМК Пресс, 2007.

Murav'iov V. V., Korenevsky S. A., Naumovich N. M.

Measuring devices of 3-mm wave-length range

The problems of development as well as methods of construction of measuring devices of 3-mm wave-length range are examined, which allow to provide high degree of accuracy of frequency and power of an input signal measurement. The opportunity and expediency of using the frequency synthesizers, sub-harmonic mixers in heterodyne channel, and logarithmic amplifiers in modulation receiver are shown. The experimental parameters are shown as well as characteristics and parameters of major units of measuring device.

Поступила в редакцию 15.09.2010.