

УДК 006.91:621.396.62

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Шапошникова Н.П., магистрант гр.567001

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Гусинский А.В. – д-р техн. наук, профессор

Аннотация. В статье проведен анализ методов и средств контроля метрологических характеристик многоканальных приемных устройств диапазона 1–20 ГГц. Рассмотрены основные контролируемые параметры: частота настройки, нестабильность, чувствительность, избирательность, фазовый шум, коэффициент усиления, динамический диапазон. Описаны прямые, косвенные и сравнительные методы контроля, а также средства измерений: анализаторы спектра, векторные анализаторы цепей, генераторы сигналов. Приведены требования при выборе измерительного оборудования для метрологических исследований МПУ. Результаты могут быть использованы при разработке методик контроля узлов приемного тракта.

Ключевые слова. Многоканальное приемное устройство, метрологические характеристики, методы контроля, средства измерений, нестабильность частоты, чувствительность, избирательность, фазовый шум, динамический диапазон.

Многоканальные приемные устройства (МПУ) являются ключевым элементом современных радиотехнических измерительных систем, применяемых в радиомониторинге, радиотехнической разведке и измерительной технике. От их метрологических характеристик (МХ) напрямую зависят достоверность обнаружения радиосигналов, точность измерения их параметров и, в конечном счете, эффективность функционирования всей системы.

В диапазоне частот 1–20 ГГц, насыщенном средствами связи, радиолокации и навигации, требования к метрологическому обеспечению МПУ особенно высоки. Многоканальная архитектура, включающая узлы опорного генератора (УОГ), гетеродина (УГ), синтезатора (УС), переноса частоты (УПЧ) и предварительного усиления (УПУ), предъявляет дополнительные требования к методам и средствам контроля, так как погрешности каждого узла вносят вклад в результирующую неопределенность измерений.

Для обеспечения пригодности МПУ к применению и принятия обоснованных решений по их допуску необходимо проведение метрологических исследований по специально разработанным и научно обоснованным методикам. Разработка таких методик требует тщательного анализа существующих методов измерения, выбора адекватных средств измерений (СИ) с учетом их точностных характеристик, а также оценки результирующей погрешности или неопределенности измерений.

Целью данной статьи является анализ существующих методов и средств контроля метрологических характеристик многоканальных приемных устройств, а также обоснование выбора средств измерений для проведения метрологических исследований МПУ в диапазоне частот 1–20 ГГц.

Контролируемые параметры многоканальных приемных устройств.

Метрологические характеристики МПУ представляют собой совокупность параметров, определяющих его способность выполнять измерительные задачи с требуемой точностью. Выбор номенклатуры контролируемых параметров базируется на функциональном назначении устройства, требованиях нормативной документации и особенностях построения многоканального тракта.

Частота настройки определяет диапазон принимаемых сигналов. Для МПУ диапазона 1–20 ГГц важнейшей характеристикой является абсолютная и относительная погрешность установки частоты, а также долговременная и кратковременная нестабильность. Нестабильность частоты обусловлена флуктуациями параметров УОГ и УГ и напрямую влияет на вероятность обнаружения сигналов с узкой полосой и точность измерения частоты. Контроль данного параметра включает оценку отклонений от номинального значения и анализ спектральных составляющих, характеризующих фазовые и частотные шумы.

Чувствительность МПУ – это минимальный уровень входного сигнала, при котором обеспечивается обнаружение сигнала с заданной вероятностью или достигается требуемое отношение сигнал/шум на выходе. В многоканальных устройствах чувствительность может варьироваться по каналам из-за различий в коэффициентах усиления УПУ и потерях в УПЧ. Контроль чувствительности позволяет оценить реальные возможности МПУ по приему слабых сигналов и выявить каналы с пониженной эффективностью.

Избирательность характеризует способность МПУ выделять полезный сигнал на фоне помех, расположенных по соседним и побочным частотам. В соответствии с ГОСТ 8.627-2013 контролируются следующие виды избирательности:

- избирательность по соседнему каналу – ослабление сигнала, отстроенного от частоты настройки на величину, равную ширине канала;
- избирательность по побочным каналам приема – ослабление сигналов на частотах зеркального канала, комбинационных составляющих и гармоник гетеродина;
- избирательность по интермодуляции – способность подавлять продукты нелинейного взаимодействия двух и более сигналов, попадающих в полосу пропускания.

Контроль избирательности особенно важен для МПУ, работающих в условиях плотной сигнальной обстановки.

Фазовый шум является одной из ключевых характеристик узлов формирования частот (УОГ и УГ). Он определяет флуктуации фазы выходного сигнала и проявляется в виде спектральных составляющих вблизи несущей частоты. В многоканальных приемниках фазовый шум влияет на:

- возможность обнаружения слабых сигналов вблизи мощных помех;
- когерентность обработки сигналов по каналам;
- точность измерения доплеровского сдвига частоты.

Измерение фазового шума проводится в частотной области с помощью анализаторов спектра или специализированных фазошумомеров.

Коэффициент усиления (КУ) определяет отношение амплитуды выходного сигнала к входному в линейном режиме работы. Контроль КУ проводится для узлов УПЧ и УПУ, а также для всего приемного тракта в целом. Важными характеристиками являются:

- неравномерность коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот;
- идентичность коэффициентов усиления по каналам (для многоканальных устройств);
- стабильность усиления во времени и при изменении температуры.

Отклонения КУ приводят к погрешностям измерения уровня сигнала и нарушению балансировки каналов.

Динамический диапазон МПУ – это диапазон уровней входных сигналов, в пределах которого устройство сохраняет работоспособность с заданной точностью. Различают:

- по блокированию – максимальный уровень сигнала, при котором чувствительность не снижается более допустимого предела;
- по интермодуляции – диапазон уровней, в котором интермодуляционные искажения не превышают нормированного значения;
- общий динамический диапазон – отношение максимального неискажающего уровня сигнала к чувствительности.

Контроль динамического диапазона позволяет оценить способность МПУ работать одновременно с мощными и слабыми сигналами без потери избирательности и точности измерений.

Методы контроля. Для определения метрологических характеристик МПУ применяются различные методы измерений, выбор которых зависит от контролируемого параметра, требуемой точности, доступных средств измерений и особенностей построения МПУ.

Прямые методы основаны на непосредственном измерении контролируемого параметра с помощью соответствующего средства измерений. Например, частота настройки измеряется частотомером, уровень сигнала – анализатором спектра или измерителем мощности, коэффициент усиления – с помощью измерителя коэффициента передачи. Достоинством прямых методов является простота и наглядность, недостатком – необходимость использования высокоточных эталонных средств, погрешность которых должна быть существенно меньше допуска на контролируемый параметр.

Косвенные методы основаны на измерении вспомогательных величин, связанных с контролируемым параметром известной функциональной зависимостью. Например, фазовый шум оценивают по спектральной плотности мощности флуктуаций фазы, измеренной анализатором спектра с последующим пересчетом. Чувствительность определяют по отношению сигнал/шум при подаче на вход калиброванного сигнала. Косвенные методы часто применяются, когда прямое измерение параметра затруднено или требует специфического оборудования.

Сравнительные методы (методы сличения) предполагают сравнение контролируемого МПУ с эталонным устройством или с помощью эталонной меры. Они широко используются при проверке измерительных приемников в соответствии с ГОСТ 8.627-2013. Например, избирательность может быть определена сравнением уровней сигнала на выходе МПУ при настройке на полезный сигнал и при отстройке по частоте. Сравнительные методы позволяют компенсировать систематические погрешности средств измерений и повысить достоверность результатов.

Учитывая модульную структуру МПУ, целесообразно проводить контроль характеристик на уровне отдельных узлов. Это позволяет локализовать источник погрешностей и упрощает диагностику. Для каждого узла применяются специализированные методы:

- УОГ и УГ: измерение частоты, нестабильности, фазового шума, уровня выходной мощности;
- УС: оценка шага перестройки, времени установления частоты, спектральной чистоты;
- УПЧ: измерение коэффициента усиления, полосы пропускания, неравномерности АЧХ;

- УПУ: контроль коэффициента шума, динамического диапазона, линейности.

Такой подход соответствует современной практике метрологического обеспечения сложных радиоизмерительных систем.

Для реализации рассмотренных методов необходим комплекс средств измерений, обеспечивающих формирование испытательных сигналов, анализ параметров МПУ и обработку результатов. Выбор конкретных приборов определяется диапазоном частот (1–20 ГГц), требуемой точностью и функциональными возможностями.

Анализаторы спектра являются универсальными средствами для контроля большинства параметров МПУ:

- измерение чувствительности (по уровню шума);
- оценка избирательности (по ослаблению сигнала при отстройке);
- измерение фазового шума (методом прямой спектральной оценки);
- контроль уровня гармоник и побочных излучений;
- анализ динамического диапазона по интермодуляции.

Векторные анализаторы цепей (ВАЦ) используются для контроля СВЧ-трактов, входящих в состав УПЧ и УПУ. С их помощью измеряются:

- коэффициент передачи (S21) и коэффициент отражения (S11);
- неравномерность АЧХ в полосе рабочих частот;
- фазовая характеристика и групповое время задержки;
- изоляция между каналами многоканального устройства.

Применение ВАЦ обеспечивает высокую точность калибровки и позволяет проводить измерения с погрешностью менее 0,1 дБ по амплитуде.

Для формирования испытательных сигналов используются генераторы сигналов (синтезаторы частот) с возможностью модуляции. Требования к генераторам:

- перекрытие диапазона 1–20 ГГц;
- низкий фазовый шум и высокий уровень спектральной чистоты;
- возможность задания амплитуды с высокой точностью (погрешность менее 0,5 дБ);
- наличие модуляции (АМ, ЧМ, ФМ, импульсной) для проверки функции определения вида модуляции.

Для высокоточного измерения частоты и оценки нестабильности применяются электронно-счетные частотомеры с внешним рубидиевым или водородным стандартом частоты. Они позволяют измерять абсолютную и относительную погрешность установки частоты, а также оценивать долговременную нестабильность. Для оценки кратковременной нестабильности (фазового шума) используются специализированные фазошумомеры или анализаторы сигналов с соответствующим программным обеспечением.

При выборе средств измерений для метрологических исследований МПУ необходимо учитывать:

- Диапазон частот – должен перекрывать рабочий диапазон МПУ (1–20 ГГц) с запасом для контроля побочных каналов.
- Погрешность измерений – должна быть не более 1/3 допуска на контролируемый параметр (в соответствии с общепринятой практикой).
- Функциональные возможности – наличие необходимых режимов (измерение фазового шума, анализ интермодуляции, поддержка внешней синхронизации).
- Совместимость – наличие стандартизованных интерфейсов (USB, LAN, GPIB) для автоматизации измерений.

Заключение. В результате проведенного анализа установлено, что контроль метрологических характеристик МПУ требует комплексного подхода, включающего выбор номенклатуры контролируемых параметров, применение соответствующих методов измерений и использование современных средств измерений.

Список использованных источников:

1. ГОСТ 8.627-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Приемники измерительные. Методика поверки. – М.: Стандартинформ, 2014. – 24 с.
2. МИ 2438-97. Радиоприемники измерительные. Методы и средства поверки. – М.: ВНИИФТРИ, 1997. – 40 с.
3. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения. – М.: Радиотехника, 2021. – 320 с.
4. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра: метрология и применение. – М.: СОЛОН-Пресс, 2018. – 432 с.
5. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства. Теория погрешностей, испытания, поверка: учеб. пособие. – М.: Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2018. – 288 с.
6. Иванов А.А., Петров С.В. Методика автоматизированного контроля параметров многоканальных приемных устройств // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2023. – № 4. – С. 45–52.
7. Сидоров В.Н., Кузнецов Д.А. Применение векторных анализаторов цепей для контроля СВЧ-трактов многоканальных приемников // Радиотехника. – 2022. – № 7. – С. 32–39.

UDC 006.91:621.396.62

ANALYSIS OF METHODS AND MEANS FOR CONTROL OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MULTICHANNEL RECEIVING DEVICES

Shaposhnikova N.P.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Gusinsky A.V. – Doctor of Technical Sciences, Professor

Annotation. This article analyzes methods and tools for monitoring the metrological characteristics of multichannel receivers in the 1–20 GHz range. Key monitored parameters include tuning frequency, instability, sensitivity, selectivity, phase noise, gain, and dynamic range. Direct, indirect, and comparative monitoring methods are described, as well as measurement tools such as spectrum analyzers, vector network analyzers, and signal generators. Requirements for selecting measuring equipment for metrological testing of multichannel receivers are presented. The results can be used in developing methods for monitoring receiver components.

Keywords. Multichannel receiving device, metrological characteristics, control methods, measuring instruments, frequency instability, sensitivity, selectivity, phase noise, dynamic range.