

Программные решения для стабилизации выходной мощности, автоматизации настройки и измерений многоканального усилителя миллиметрового диапазона

И.В. Горюнов, В.А. Луньков, С.Н. Савельев, Е.В. Терёшкин, Н.А. Фёдоров

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в данной работе произведён анализ неравномерности выходной мощности многоканального усилителя миллиметрового диапазона, предложены программные решения данной проблемы, приведена измеренная зависимость выходной мощности от частоты и температуры до и после её подстройки.

Ключевые слова: миллиметровый усилитель, автоматизация измерений, подстройка мощности.

1. Введение

Усилительные модули миллиметрового диапазона, предназначенные для работы в непрерывном и импульсном режимах, широко используются в большинстве изделий СВЧ электроники, в том числе в современных радиолокационных системах. Одним из основных требований, предъявляемых к ним, являются жёсткие ограничения по неравномерности выходной мощности, как в рабочем частотном диапазоне, так и при различных температурных воздействиях. Существенные изменения мощности усиленного сигнала приводят к нарушению целостности передаваемой информации и в ряде случаев могут привести к повреждению входных цепей приёмника. Устранение перепада выходной мощности изделия является актуальной задачей, трудноразрешимой классическими методами.

Целью данной работы является программная корректировка неравномерности АЧХ многоканального усилителя миллиметрового диапазона, входящего в состав комплексированного изделия при всех режимах эксплуатации.

2. Анализ неравномерности выходной мощности и решения её снижения

На рисунке 1 представлена типичная АЧХ одного из каналов пятиканального усилителя мощности миллиметрового диапазона, предназначенного для работы в непрерывном и импульсном режимах, полученная в нормальных условиях.

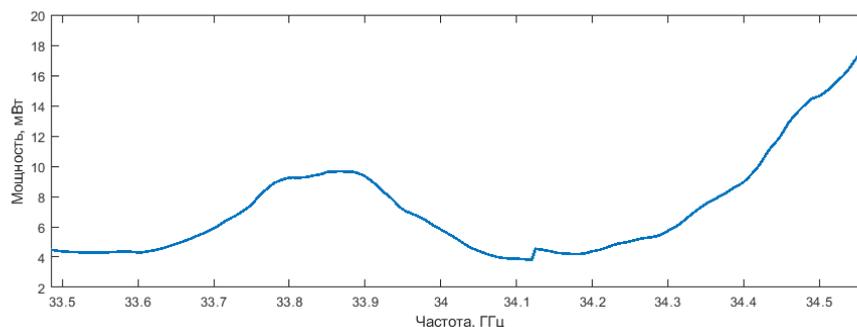


Рисунок 1. Неравномерность выходной мощности при изменении частоты.

Данная зависимость приведена без каких-либо дополнительных регулировок и является результатом нелинейности характеристик МИС усилителей, фильтров, а также других неоднородностей тракта.

Для предварительного определения характера неравномерности выходной мощности модуля при различных температурах проведены соответствующие измерения в диапазоне от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом в $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. После сбора первичных данных измерений и последующего регрессионного анализа полученных зависимостей установлено, что изменение температуры имеет экспоненциальный характер с перегибом в области положительных температур. Для упрощения процедуры подстройки, а также увеличения скорости выполнения алгоритма экспоненциальная зависимость преобразована в ряд линейных зависимостей, каждая из которых соответствует определённому температурному диапазону. Результат преобразования представлен на рисунке 2.

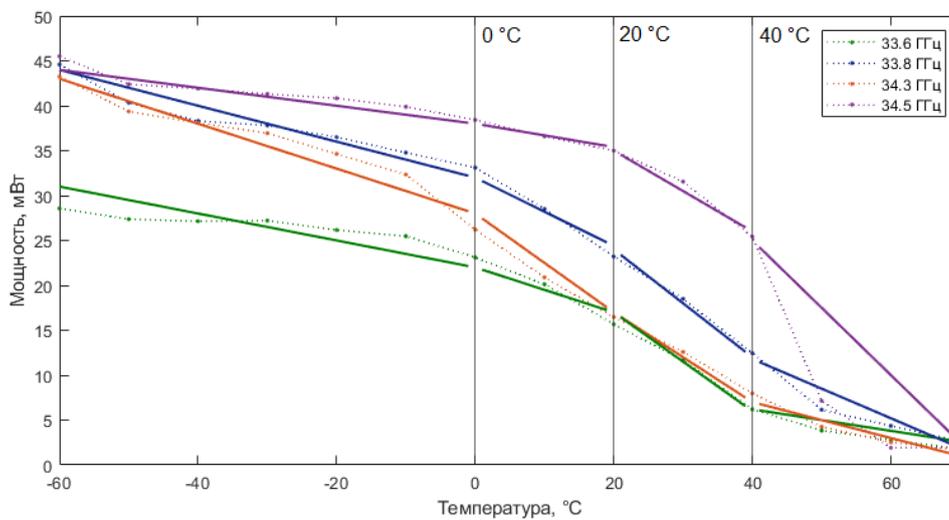


Рисунок 2. Разбиение температурного диапазона на подстроечные интервалы. Пунктиром обозначены результаты реальных измерений, сплошной линией – линейная аппроксимация зависимости.

В связи с тем, что в состав усилительного тракта включены усилительные МИС с интегрированными аналоговыми аттенюаторами, существует возможность коррекции, представленной АЧХ подавлением сигнала, с помощью метода введения поправочных коэффициентов. Из рисунка 1 следует необходимость управления амплитудой в рабочем диапазоне частот при нормальных условиях, рисунок 2 иллюстрирует различия в крутизне изменения выходной мощности при различных частотах во всех температурных интервалах. Таким образом, настройка модуля разбивается на два этапа: устранение неравномерности в частотном диапазоне и определение угловых коэффициентов крутизны при термическом воздействии.

Процесс корректировки АЧХ модуля проводится на этапе настройки комплексированного устройства в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения, выполняемого на ПК в составе измерительного стенда. На основании показаний, полученных от измерителя мощности и температурных датчиков ПО определяет требуемый температурный коэффициент и производит его запись в ПЗУ микроконтроллера настраиваемого изделия. При этом существует возможность дискретизации ряда частотных точек на сегменты по 32, 16, 8, 4 и 2 точки для уменьшения времени выполнения алгоритма.

3. Модернизация аппаратной части модуля и обзор средств измерений

Модернизация усилителя проводилась без изменения конструкции и габаритных размеров модуля, что позволило существенно улучшить характеристики уже выпускаемого изделия с минимальными затратами. Контроль текущего значения рабочей частоты осуществляется с помощью программного пересчётом номера частотной точки, контроль температуры усилительного модуля и изделия в целом осуществляется с помощью двух термодатчиков – аналогового сенсора, расположенного в непосредственной близости от МИС СВЧ тракта и сенсора, интегрированного в микроконтроллер. В целях дополнительного снижения влияния изменений температуры на работу цепей управления мощностью изделия, усилителей постоянного тока и преобразователей уровней управляющего сигнала в схему были добавлены прецизионные источники опорных напряжений. Структурная схема системы регулировки мощности миллиметрового усилителя, полученная в результате внесённых изменений, представлена на рисунке 3.

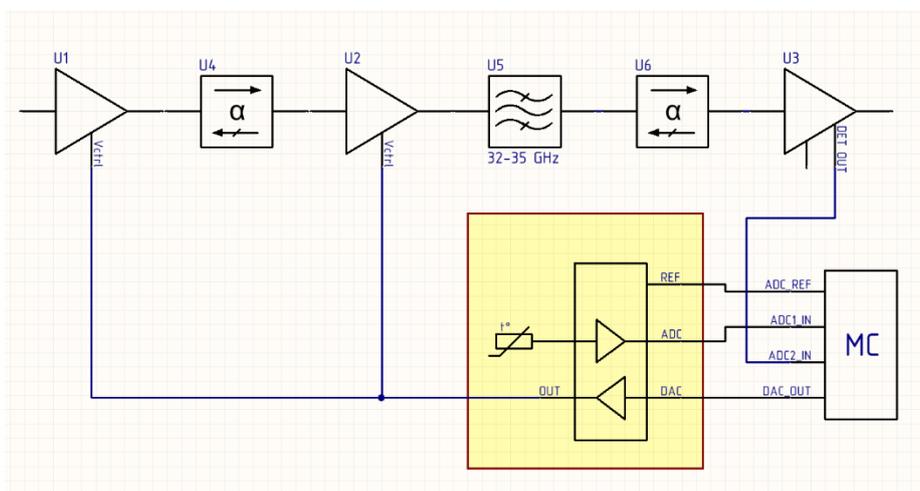


Рисунок 3. СВЧ тракт усилителя с системой регулировки мощности.

В связи с высокой плотностью монтажа конструктивно плата согласования представляет собой четырёхслойную ПП с глухими переходными отверстиями, монтируемую в корпус с помощью пайки.

Обработка показаний датчиков и последующее управление аттенуаторами усилительных МИС осуществляется платой управления комплексированным изделием, ядром которой является 32-битный микроконтроллер.

Для проведения измерений и автоматической калибровки выходной мощности модуля в различных условиях эксплуатации организован стенд, включающий в свой состав анализатор спектра Keysight N9030A, измеритель мощности N1914A, камеру тепла-холода Terchy MUC-72CVK и ПК. Измерительные инструменты объединены с управляющим ПК с помощью локальной сети Ethernet, настраиваемое изделие подключается к ПК посредством интерфейса RS-422.

3. Программное обеспечение автоматизации измерений и настройки модуля

Программное обеспечение для управления изделием можно условно разделить на две основных составляющие: ПО, встроенное в микроконтроллер (прошивка), и прикладное ПО, исполняемое на ПК. В процессе первичной настройки прибора происходит обмен между персональным компьютером, измерительными приборами и изделием, с состав которого входит миллиметровый усилитель. Подбор требуемого

значения мощности происходит с использованием метода дихотомии в установленном интервале напряжений. Для обеспечения стабильного обмена данными, удобства обслуживания кода и простоты его дальнейшей модернизации при разработке архитектуры прикладного ПО использовались типовые шаблоны проектирования – «Стратегия», «Посредник», «Одиночка». Упрощённая диаграмма классов представлена на рисунке 4.

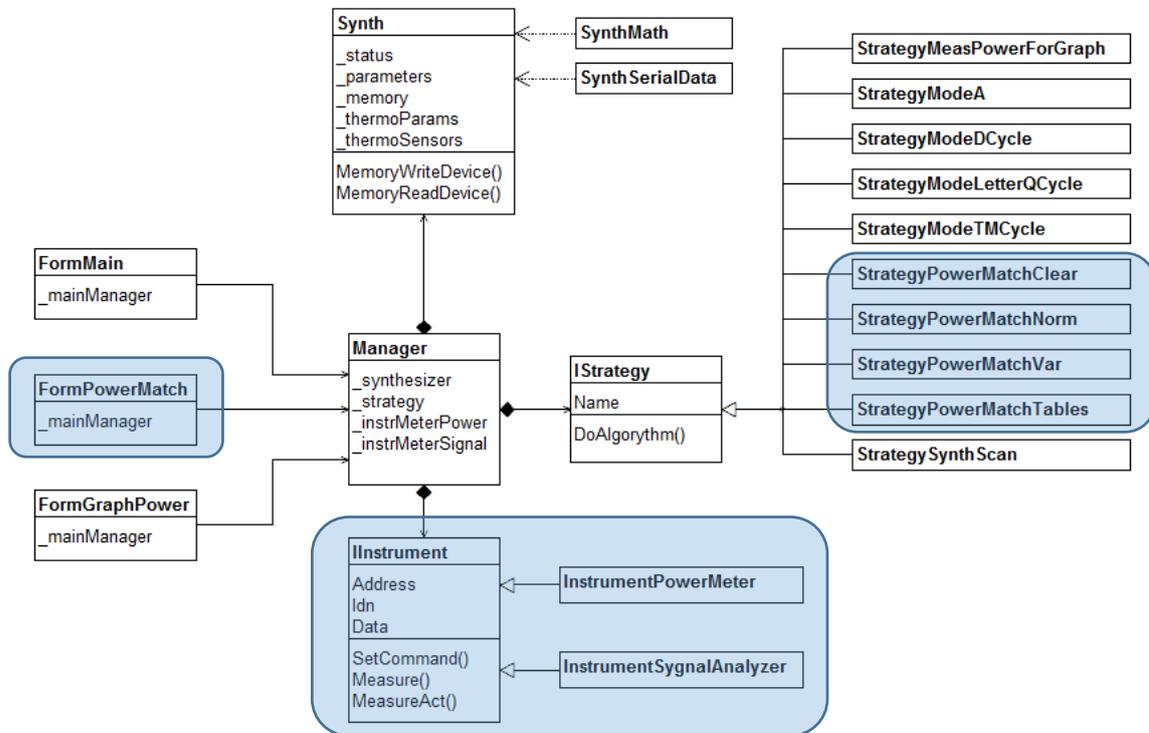


Рисунок 4. Упрощённая диаграмма классов прикладного ПО. Синим цветом отмечены классы, являющиеся основой системы подстройки мощности.

В описываемом прикладном ПО реализован многопоточный обмен данными с различными устройствами, синхронизация потоков осуществляется с помощью механизма, основанного на событиях. Для сбора данных с измерительных устройств используется библиотека Keysight VISA, результаты измерений сохраняются в CSV файлы для последующей обработки в САПР.

Встраиваемое ПО написано на языке ассемблера для обеспечения минимального времени выполнения критических участков кода. Проект имеет блочную структуру, для освобождения ресурсов процессора активно используется модуль DMA.

4. Результаты устранения неравномерности программными методами

В процессе тестирования программного обеспечения и измерительного стенда при подстройке АЧХ изделия во всём диапазоне рабочих частот и допустимых температур опробованы различные варианты разбиения частотного диапазона на сегменты: по 8, 4, 2 и 1 точке. При конфигурации ПО установлены основные настройки системы подбора: требуемый уровень мощности – 4,5 мВт, допустимое отклонение от номинала – 0,1 мВт. Уровень мощности указан с учётом потерь в кабелях и переходах. После завершения процесса подстройки в худшем случае (8 точек) разброс значений мощности в нормальных условиях составил 2,08 мВт при времени выполнения алгоритма 9 минут. Лучший результат показала индивидуальная подстройка каждой

точки – 0,25 мВт, при этом затраченное время ожидаемо выросло до 72 минут. Результаты различных вариантов разбиения представлены на рисунке 5.

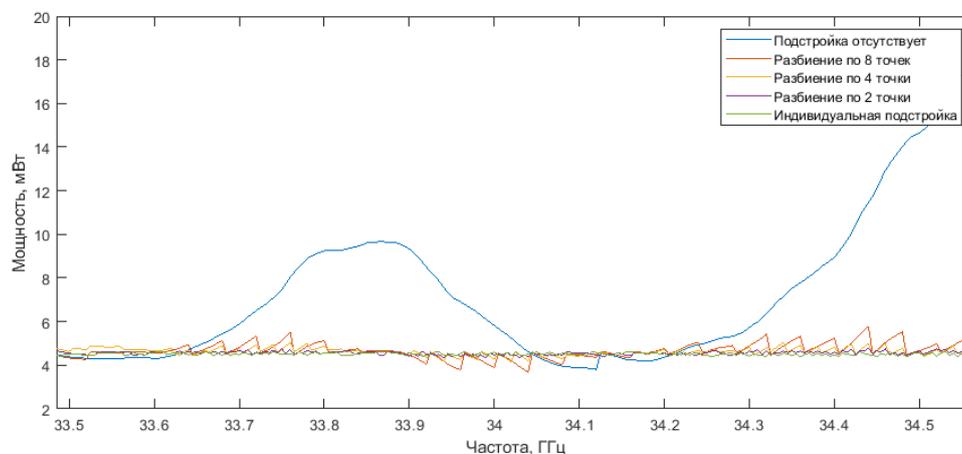


Рисунок 5. Подстройка мощности к уровню 4,5 мВт при различных вариантах разбиения частотного диапазона в нормальных условиях.

В процессе температурных испытаний в ПЗУ микроконтроллера изделия записываются также калибровочные коэффициенты температурных сенсоров и устанавливаются границы температурных интервалов. Благодаря данным параметрам существует возможность изменения точек перегиба зависимости крутизны перепада мощности от температуры для различных модулей. Существует также возможность изменения количества частотных точек в сегментах подстройки.

Без использования системы подстройки перепад мощности составил 17,7 дБ (рисунок 6).

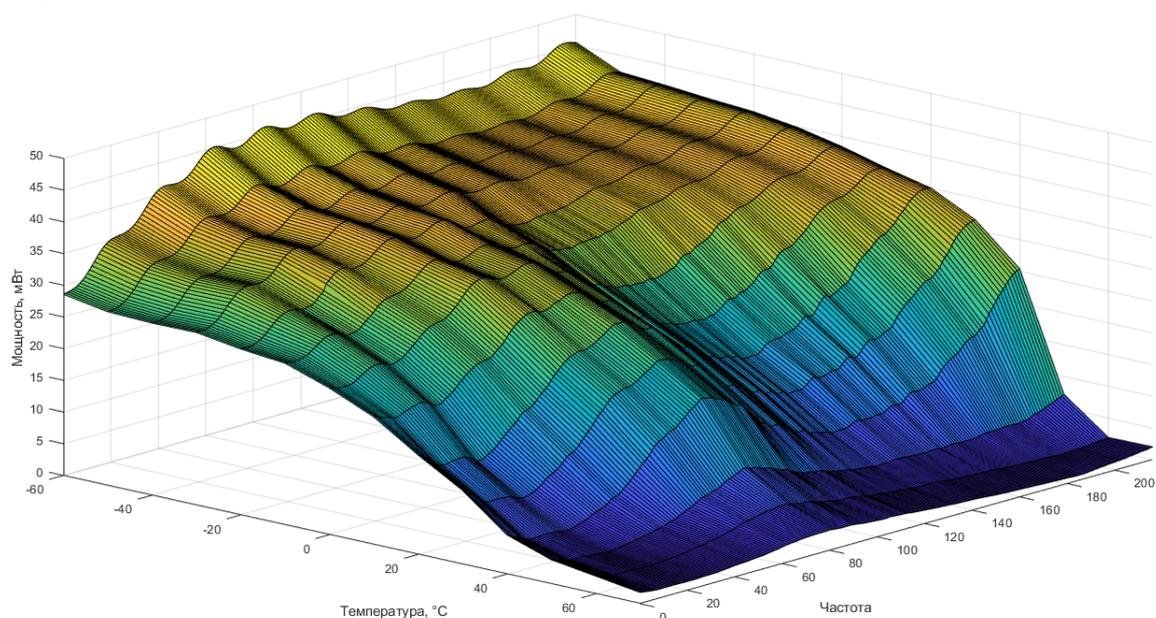


Рисунок 6. Неравномерность выходной мощности в диапазоне рабочих частот и температур без каких-либо регулировок.

В результате использования системы подстройки мощности данный перепад удалось существенно уменьшить, по итогам измерений он составил 2 дБ (рисунок 7).

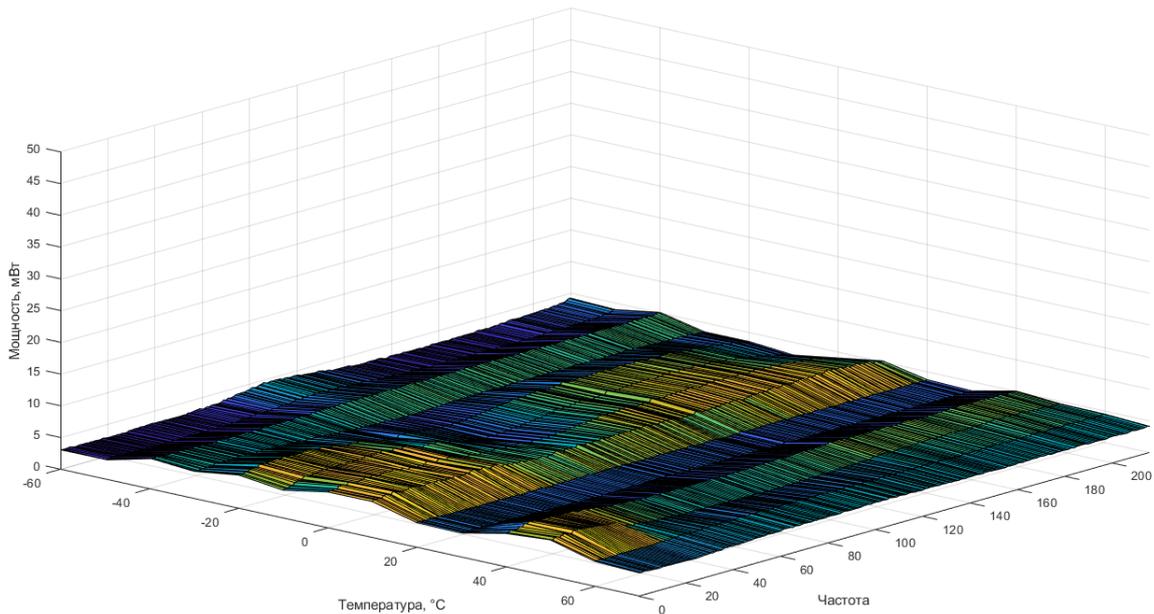


Рисунок 7. Неравномерность выходной мощности в диапазоне рабочих частот и температур после использования системы регулировки.

Дальнейшее улучшение характеристик неравномерности выходной мощности связано с повышением степени приближения полученных зависимостей, а также совершенствованием алгоритмов подстройки.

6. Заключение

В результате проведённой работы опробованы алгоритмы подстройки нелинейного параметра модуля, в данном случае, выходной мощности. Данный метод успешно показал себя в экспериментальном образце. Спроектированное в ходе работ программное обеспечение обладает архитектурой, позволяющей без существенных глубоких изменений приспособить его для решения других аналогичных задач, связанных с управлением нелинейными величинами, например, подстройки опорных уровней в петле ФАПЧ, подбора коэффициентов управляющих микросхем синтезаторов частот или цифро-аналоговых преобразователей и многого другого.