

Измерения некоторых характеристик ЭМС при тестировании приемно-передающих модулей

Николай ЛЕМЕШКО,
в.н.с., д.т.н., АО «Корпорация «Комета»,
nlem83@mail.ru,
Дмитрий БОГАЧЕНКОВ,
руководитель направления ЭМС,
ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС»,
dmitry.bogachenkov@rohde-schwarz.com,
Илья РАХМАНОВ,
руководитель проектов ЭМС,
ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС»,
ilia.rakhmanov@rohde-schwarz.com

В статье на основе анализа назначения приемно-передающих модулей (ППМ) и их типовой структурной схемы выявлены типовые проблемы ЭМС, для характеристики которых могут использоваться типовые показатели. Исходя из режимов работы ППМ, соответствующих наибольшей помехоэмиссии и наименьшей помехоустойчивости, предложены общие схемы измерений названных показателей ЭМС на примере решений компании Rohde&Schwarz. Рассмотрены узловые моменты в части подготовки к проведению таких измерений.

Введение

К радиотехническим системам (РТС), реализующим функции радиосвязи и радиолокации, предъявляются исключительно высокие требования по характеристикам, определяющим эффективность их применения. Для радиосвязи таковым является предельная дальность при сохранении заданного качества передачи информации, а для радиолокации — минимальный размер обнаруживаемой цели для ее заданного удаления. Такие параметры технических средств и, в частности, РТС принято называть выходными.

Приемно-передающие модули (ППМ) различного назначения, частотного диапазона и выходной мощности являются базовыми элементами многих РТС. В частности, конструирование активных фазированных антенных решеток (АФАР) осуществляется с использованием ППМ, каждый из которых подключается к своему излучателю, а также оснащен цепями питания и управления. ППМ можно встретить не только в антеннах радиолокаторов, но и в оборудовании связи. В ряде случаев приемно-передающие модули находят одиночное применение, например в составе цифровых сетей дуплексной связи типа «точка – точка».

Наиболее часто в составе антенн используются ППМ в количестве 10–1000 шт. Для обеспечения оптимальных характеристик РТС необходима качественная работа каждого из этих модулей. Одной из причин, приводящих к снижению эффективности использования РТС, является воздействие помех, порожденных не только внутри ППМ, но и другими техническими средствами. Вопрос обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) для ППМ, а также измерений ее показателей выступает на первый план, если учесть близкое расположение ППМ и единство их систем электропитания и управления, а также наличие общей для них распределительной системы опорных и других сигналов. Ввиду высокого практического значения названного направления целесообразно рассмотреть методы измерений некоторых показателей ЭМС для ППМ, в то же время учитывая, что требования по радиоэлектронной защите, а также особенности испытаний по ЭМС обычно конкретизируются в технических заданиях на разработку технических средств, а также в отраслевых и государственных стандартах на конкретные виды РТС.

Типовые проблемы ЭМС ППМ

Типовые проблемы ЭМС для ППМ определяются двумя аспектами — назначением, т. е. режимом работы модулей и их системотехникой. Если говорить о радиолокационных станциях (РЛС), то обычно их ППМ работают в импульсном режиме излучения, а циклы пере-

дачи и приема строго разнесены во времени. В то же время использование ППМ в пролетах радиолиний при дуплексной связи иногда предусматривает частотное разделение циклов приема и передачи при одновременной их реализации. Структурная схема ППМ РЛС [1] и его типовые внешние подключения показаны на рис. 1. Цепи электропитания и управления не показаны для упрощения.

Передающее плечо ППМ обеспечивает усиление по мощности и импульсную модуляцию для сигнала, поступающего с возбуждателя через делитель мощности на группу ППМ. Приемное плечо ППМ включает амплитудный ограничитель, маломощный усилитель (МШУ), полосовой фильтр, устройство временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ), необходимое для компенсации потерь на распространение волн в свободном пространстве при их следовании от АФАР до цели и обратно.

Оба плеча ППМ подключаются к прочим узлам при помощи высокочастотных переключателей, в качестве которых могут использоваться циркуляторы [2] либо мосты на их основе. На антенной стороне ППМ подключается к элементарному излучателю АФАР через согласующее устройство. Фазовращатель в составе ППМ обычно выполняется как пассивное устройство и используется в формировании фазового распределения и в режиме передачи, и в режиме приема. В качестве возбуждателя обычно применяется высококачественный генератор сигналов с оптимизированными по каким-либо критериям видами модуляции, например с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), широко применяемой для радиолокации.

Типовые проблемы ЭМС ППМ состоят в следующем.

I. Внеполосные и побочные излучения. Структура ППМ, представленная на рис. 1, предполагает многократное усиление сигналов в передающем плече. Сигнал в возбуждателе вначале формируется на некоторой промежуточной частоте, а затем переносится на более высокие частоты. Общее количество таких переносов может достигать трех–четырех в зависимости от диапазона работы АФАР. Зачастую активные узлы тракта работают при достаточном минимальном запасе по линейности, поскольку расширение динамического диапазона существенно повышает стоимость каждого ППМ. По этой причине в выходном сигнале ППМ появляются побочные излучения, обычно присутствующие на комбинационных частотах [3]. Что касается внеполосных спектральных составляющих, то они порождаются модуляцией в возбуждателе, отличающейся от ее идеального математического описания, а также, в некоторых случаях, ограниченным проявлением интермодуляционных эффектов.

II. Кратковременное расширение занимаемой полосы при включении и выключении излучения АФАР. Формирование импульсного излучения РЛС осуществляется, как это видно из рис. 1, с использова-

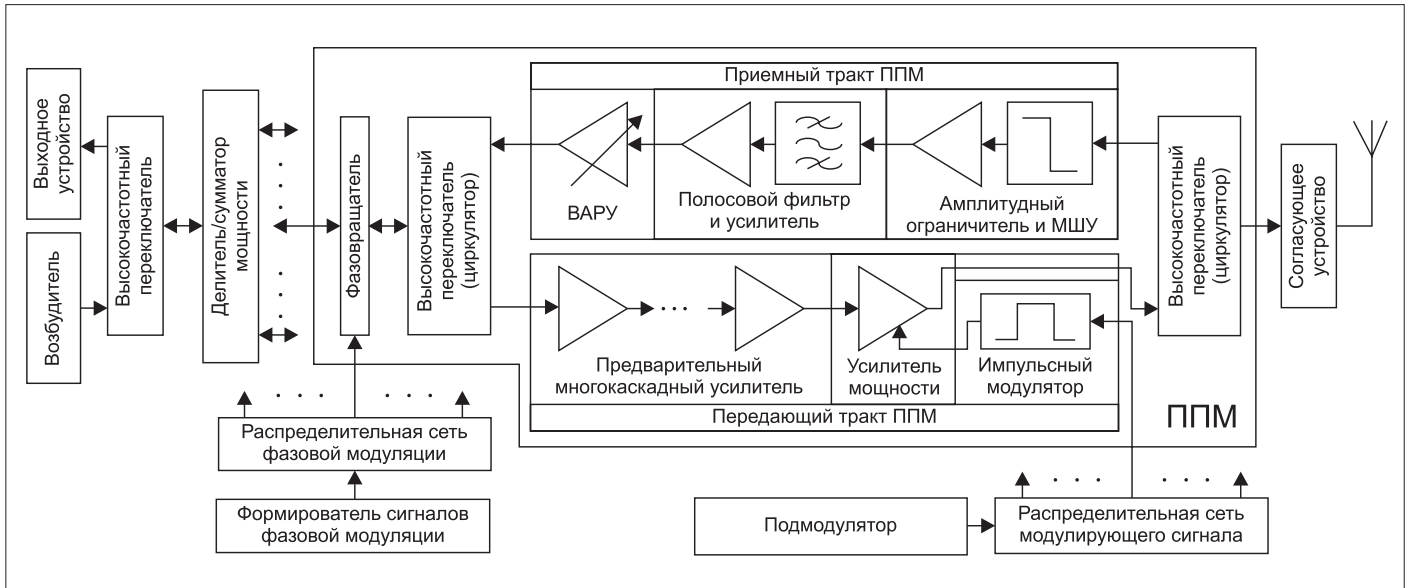


Рис. 1. Структурная схема ППМ и его внешние подключения

нием импульсного модулятора. Цикличность формируемого излучения согласуется с формированием первичного сигнала возбудителем. Переходные процессы включения и выключения излучения могут сопровождаться кратковременным расширением спектра с поражением смежных полос частот. Появление такого расширения, а также его границы и длительность должны оцениваться для ППМ с выходной мощностью более 5 Вт.

III. Проникновение мощности из близко расположенных ВЧ-трактов способно оказывать влияние на функционирование ППМ, если вблизи АФАР расположены другие передающие антенны либо если в конструкции АФАР использованы разные ППМ, работающие в индивидуальных полосах частот через мосты сложения на одни и те же излучатели. Проникновение мощности может нарушать работу как приемного, так и передающего плеча ППМ. В первом случае может возникнуть перегрузка, а при неблагоприятной отстройке по частоте — попадание спектральных составляющих мешающего сигнала в полосу выходного сигнала, возможность которого проверяется с учетом переноса по частоте [4]. Нарушение работы передающего плеча при значительном рассогласовании с антенным устройством может проявляться в смещении рабочей точки выходного усилительного элемента ППМ, а также в появлении паразитной модуляции его выходного сигнала.

IV. Пониженное качество питающего напряжения ППМ. Как правило, каждый ППМ имеет индивидуальный источник вторичного электропитания, и все они в совокупности подключаются к общим шинам. Одновременное переключение ППМ в передающий режим приводит к импульсному отбору мощности, сопровождаемому соизмеримым по продолжительности провалом напряжения. Такие провалы вызваны падением напряжения на индуктивностях шин электропитания. Использование в ППМ импульсных источников электропитания с накопительным элементом достаточной емкости позволяет несколько смягчить проблему. Провалы напряжения не должны вызывать заметное изменение мощности выходного излучения. В противном случае при работе РЛС теряется оптимальность обработки принятых сигналов, например с ЛЧМ [5].

V. Эмиссия помех в цепи заземления ППМ. ППМ обычно выполняются в экранированном корпусе, в т. ч. в целях обеспечения ЭМС. Согласно теории экранирования [6], конструкции подлежат заземлению по высокой частоте. Корпуса ППМ часто используют как коллекторы тока, подключая их к одному из потенциалов электропитания. Одновременно через них, а также цепи заземления протекают помехонесущие токи, порожденные внутренними схемами ППМ и внешними источниками. Для сохранения приемлемой электромагнитной обстановки уровень помех, инжектируемых ППМ в цепи

заземления, подлежит контролю и нормированию.

VI. Восприимчивость к помехам по цепям заземления. ППМ функционируют в условиях порожденных их совокупностью кондуктивных помех, которые могут стать причиной сбоев в их работе, включая нежелательные эффекты в радиотрактах. ППМ должны проявлять определенную стойкость к помехам по цепям, которая также устанавливается нормативными документами.

Для каждой из названных проблем ЭМС ППМ используются сообразные им показатели. Перечисленная номенклатура проблем ЭМС определяется назначением и функциональными особенностями ППМ. Для получения полной совокупности подлежащих измерениям характеристик ЭМС ППМ следует добавить к ним те, которые описывают их типовые свойства в режиме передачи и приема [3], например избирательность по зеркальному каналу приема.

В общем случае ППМ могут иметь существенные особенности в схемотехнике и конструкции, которые дополняют представленную совокупность проблем ЭМС новыми пунктами либо видоизменить ее. Примером является ситуация, когда на одной и той же плоской несущей конструкции расположены две АФАР, обращенные друг к другу обратными сторонами антенных полотен. В этом случае одной из проблем ЭМС является взаимное проникновение высокочастотной мощности из передающего тракта одной АФАР в приемный тракт другой. Такой процесс усугубляется сравнительно близким расположением излучателей разных АФАР, при котором активизируется индуктивно-емкостной механизм связи ближней зоны, характеризуемый существенно меньшими потерями, чем механизм излучения [7].

Наиболее часто требования ЭМС для ППМ в Российской Федерации предъявляют на основании следующих стандартов:

- ГОСТ РВ 6601-001-2008 «Оборудование бортовое авиационное. Общие требования к восприимчивости при воздействии электромагнитных помех и методики измерений»;
- ГОСТ РВ 6601-002-2008 «Оборудование бортовое авиационное. Общие требования к допустимым уровням создаваемых электромагнитных помех и методики их измерений»;
- ГОСТ РВ 52226-2004 «Устройства радиопередающие. Требования к основным параметрам внеполосных и побочных излучений».

Для РТС специального назначения в РФ действуют государственные и отраслевые стандарты ограниченного доступа. Требования по ЭМС для ППМ устанавливаются и нормативными документами других государств; например, в США в отношении военной техники действует общий стандарт MIL-STD-461G, применимость требований которого определяется классом объекта размещения РТС.

При этом обзор литературы и опыт проведения испытаний ППМ для РЛС показал нехватку информации о схемах измерений показате-

лей, характеризующих перечисленные выше основные проблемы ЭМС ППМ и проверок на соответствие требований нормативных документов. Что касается остальных характеристик ППМ, то методы их измерений описаны в немногих в научно-прикладных статьях (например, [8]). Такое положение дел во многом определяется тем, что АФАР до недавнего времени применялись в основном в РТС специального назначения [1], методики испытаний которых не подлежат свободному распространению. Однако схемы измерений ряда показателей ЭМС могут быть построены на основе понимания их физической сущности.

При разработке методов и схем тестирования ППМ конкретных типов следует учитывать, что они характеризуются большой потребляемой и выходной мощностью, значительным тепловыделением и, как правило, нестандартными напряжениями электропитания. По этой причине рассматриваемые ниже схемы измерений на практике должны дополняться соответствующими вспомогательными элементами и оснасткой, обеспечивающими максимально возможное приближение к условиям штатной эксплуатации.

Схемы измерений показателей ЭМС для ППМ

Выполнение измерений показателей ЭМС ППМ обычно осуществляется в целях сопоставления с нормами помехоэмиссии и помехоустойчивости. Предлагаемые ниже схемы измерений имеют обобщенную форму и сформированы на основе методов испытаний ППМ, применяемых в АФАР РТС авиационного базирования. Они не являются единственным вариантом определения тех или иных показателей ЭМС. При проведении измерений также следует учитывать, что показатели ЭМС в общем случае зависят от значения питающих напряжений, климатических и других воздействий [7]. Поскольку измерения следует проводить в электромагнитной обстановке, которая не влияет на их результаты и не маскирует компоненты излучаемых радиопомех, предпочтительным вариантом является использование безэховых экранированных камер.

I. Внеполосные и побочные излучения (ГОСТ РВ 52226–2004) могут измеряться в относительных или абсолютных величинах при заданной полосе разрешения. Схема измерений (рис. 2) включает в себя анализатор спектра как основное средство измерений, элементы для его подключения к высокочастотному тракту (ВЧТ), а также ряд узлов, обеспечивающих штатный режим работы ППМ. Все элементы ВЧТ должны быть откалиброваны по коэффициенту передачи в направлении распространения сигналов, например с использованием векторных анализаторов цепей серии R&S ZNA.

При выполнении измерений ППМ переводится в режим передачи. В качестве возбудителя может использоваться высококачественный векторный генератор сигналов, например R&S SMW200A. Атенюатор (1) применяется для согласования возбудителя и ППМ по мощности входного сигнала. Выходной сигнал ППМ проходит через штатное

согласующее устройство и направленный ответвитель (НО) на эквивалент антенны, в качестве которого обычно выступает поглощающая нагрузка. Атенюатор (2) служит для улучшения условий согласования выхода низкой мощности НО со входом анализатора спектра. В составе схемы измерений возбудитель, импульсный модулятор и анализатор спектра могут быть охвачены единой синхронизацией, что позволяет соотнести по времени начало формирования сигнала возбудителем, активацию выходного усилителя мощности и запуск развертки на анализаторе спектра. Если ППМ тестируется установленным в АФАР, то для запуска развертки анализатора спектра может использоваться режим запуска от детектора мощности на промежуточной частоте [9]; кроме того, рекомендуется режим анализа в реальном времени. Источником синхросигнала может являться любой подходящий генератор, в т. ч. из состава АФАР. Сигнал управления фазовым сдвигом в схеме на рис. 2 обеспечивает установку постоянного смещения по фазе. При необходимости измерения выполняются для разных значений фазовых углов, однако влияние фазового сдвига на уровень внеполосных и побочных излучений обычно не наблюдается.

Используемые в этой и других, рассматриваемых ниже, схемах измерений вспомогательные устройства, как правило, конструируются под конкретную серию ППМ либо являются частью аппаратуры из состава АФАР. То же касается эквивалентов антенны и НО. Конкретная серия анализаторов спектра выбирается по частотному диапазону АФАР, а также в соответствии с потребностью в дополнительных измерительных функциях, причем верхняя граница рабочего диапазона для поиска внеполосных составляющих спектра на гармониках должна быть более чем в пять раз выше максимальной рабочей частоты ППМ [4]. Как следует из таблицы распределения радиочастот между радиослужбами РФ в диапазоне 3 кГц—300 ГГц [10], наиболее часто для работы РЛС применяются полосы частот из диапазона 1–20 ГГц.

Измерения помехоэмиссии традиционно проводятся с использованием измерительных приемников. В соответствии с требованиями стандартов по ЭМС измерительных приемников, например последней редакции ГОСТ CISPR 16–1–1–2016 [14], а также согласно требованиям ФЗ РФ № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [15] у этих приемников должны быть нормированные метрологические характеристики, включая соответствующие диапазонам измерений полосы частот, специальные полосы пропускания по уровню –6 дБ. Приемники должны обеспечивать КСВН по входу не более 1,2 в полосе частот 9 кГц—1 ГГц и не более 2 в полосе частот 1—18 ГГц (при ослаблении входного аттенюатора 10 дБ), а также иметь высокий динамический диапазон, определенные виды детекторов и т. д.

На сегодняшний день из всего перечня измерительных приборов, внесенных в Государственный реестр средств измерений (ГРСИ), следует выделить измерительные приемники R&S ESW и R&S ESR, полностью соответствующие требованиям указанных стандартов.

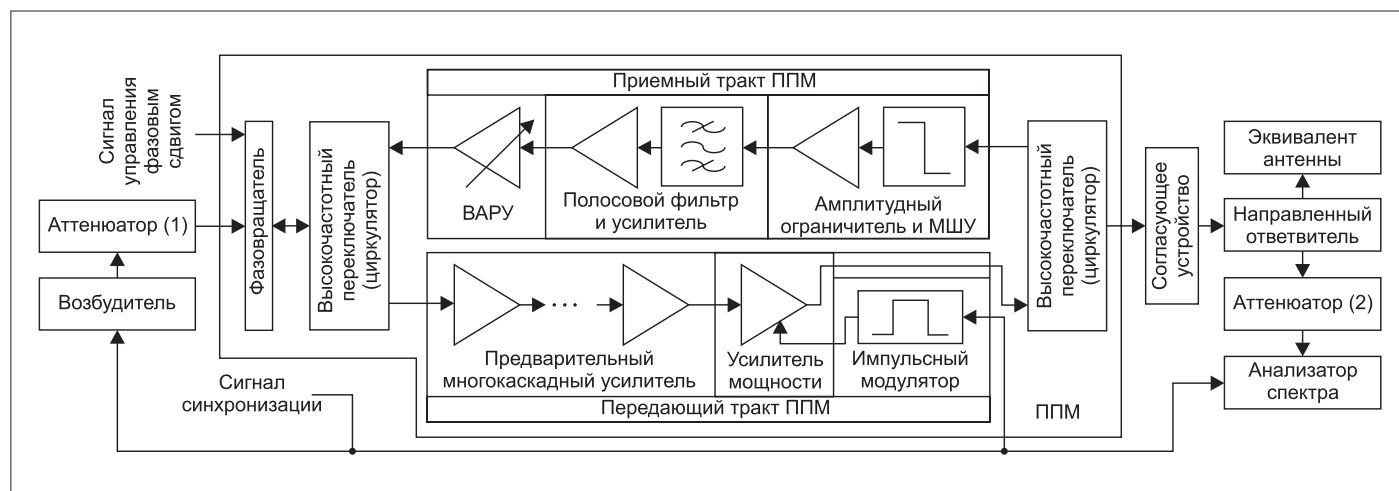


Рис. 2. Схема измерений внеполосных и побочных излучений ППМ

Эти приемники обеспечивают автоматизированные измерения помехоэмиссии: быстрое предварительное сканирование для выявления участков спектра, предположительно пораженных повышенной помехоэмиссией, а затем подвергаются стандартизованным измерениям. Кроме того, приемники имеют функцию анализатора кратковременных радиопомех, в отношении которых действуют специальные нормы помехоэмиссии. В приемниках серий R&S ESW и R&S ESR реализована защита высокочастотного входа от импульсных перенапряжений, особо полезная при измерениях кондуктивных помех со значительными и — в общем случае — неизвестными уровнями, что позволяет обезопасить прибор от выхода из строя и дальнейшего дорогостоящего ремонта.

В качестве альтернативных средств, при строгом подходе не заменяющих измерительные приемники, могут рассматриваться анализаторы спектра, например серии R&S FSW с рабочей полосой до 87 ГГц, в которых функционал измерительного приемника (соответствующие полосы пропускания по уровню -6 дБ) реализован как отдельная опция FSW-K54. В этом случае рекомендуется дополнительно применять специальное программное обеспечение, например СПО R&S ELEKTRA, что позволяет проводить измерения в соответствии с требованиями стандартов по ЭМС [16].

II. Измерение характеристик кратковременного расширения занимаемой полосы при включении и выключении излучения ППМ. Переходные процессы, возникающие в передающем плече ППМ на начальном и конечном этапах цикла излучения, могут сопровождаться кратковременным расширением спектра [3], которое представляет потенциальную опасность для радиослужб, работающих в смежных полосах частот. Мерой такого расширения могут служить следующие характеристики, определяемые по раздельности для верхней и нижней частей спектра полезного сигнала при включении и выключении излучения:

- ширина поражаемой полосы частот, отсчитываемая, например, от частоты, соответствующей снижению спектральной плотности на 30 либо 60 дБ;
- длительность поражения смежной полосы частот, определяемая интервалом времени с момента превышения установившегося уровня спектральной кривой до ее возвращения к нему.

Предлагаемая к использованию схема измерений приведена на рис. 3. В части подключения ППМ к элементам измерительной оснастки она в целом соответствует рис. 2. Отличие в том, что сигнал синхронизации не охватывает анализатор спектра. В то же время к нему предъявляются особые требования: во-первых, он должен иметь режим анализа в реальном времени и, во-вторых, режим запуска развертки от детектора мощности на промежуточной частоте. Такие требования определяются скоротечностью расширения спектра; классические анализаторы спектра последовательного действия без дополнительных функций для таких измерений не подходят.

Вначале измеряется ширина поражаемой полосы частот. Для этого анализатор спектра переводится в режим реального времени и непрерывной развертки. При поступлении сигнала синхронизации в импульсный модулятор и возбудитель на выходе ППМ появляется сигнал с расширенным спектром, который регистрируется анализатором за счет высокой скорости захвата спектрограмм. Если полоса анализа в реальном времени недостаточна для обзора всей полосы сигнала, как это свойственно, например, системам широкополосной радиолокации [5], то полосу обзора устанавливают таким образом, чтобы граница занимаемой полосы примерно соответствовала центральной частоте. Пораженную полосу определяют смещением по частоте точки, соответствующей одному и тому же уровню относительно опорного уровня спектрограммы (рис. 4а). Расширение спектра рекомендуется оценивать по уровню спада спектральной кривой, равному 60 дБ, т. к. считается [3], что за пределами соответствующей полосы частот спектральные составляющие полезного сигнала отсутствуют вовсе. Как видно из рисунка, ширина пораженной полосы частот может меняться в зависимости от выбранного уровня, поэтому в документации на ППМ он должен быть задан.

Измерение времени поражения смежной полосы частот выполняется исходя из следующих предпосылок. В пределах пораженной полосы частот выбирается точка (примеры показаны на рис. 4а), для которой будут проводиться измерения. Эта частота должна располагаться внутри пораженной полосы вблизи края спектрального спада в установившемся режиме, например с отстройкой в 10% от Δf_{-30} (Δf_{-60}), но такой, чтобы разность между уровнями спектра была заметной. Анализатор спектра переводится в режим анализа с нулевой полосой обзора и запуском развертки по сигналу детектора мощности на промежуточной частоте (ПЧ). Полоса разрешения должна выбираться малой в сравнении с полосой Δf_{-30} (Δf_{-60}). Как только на входе анализатора спектра появляется сигнал с выхода ППМ, мощность сигнала на промежуточной частоте $P_{ПЧ}$ превышает заданное значение, детектор мощности запускает развертку, и анализатор отображает зависимость мощности на ПЧ от времени. Детектор мощности обычно имеет полосу частот до 200 МГц и в анализаторе спектра является отдельным аппаратным средством. Цена деления развертки по времени современных анализаторов спектра может составлять единицы микросекунд, и такого разрешения оказывается вполне достаточно для измерений времени поражения. Отсчет длительности поражения t_n выполняется с момента превышения установившегося уровня мощности до выхода на него же после завершения переходных процессов в передающем плече ППМ (рис. 4б). Колебания мощности можно при необходимости сгладить.

Что касается режима выключения излучения, то измерение поражаемой полосы проводится по тем же принципам – на основе анализа спектра в реальном времени. Сложнее обстоит дело с длительностью

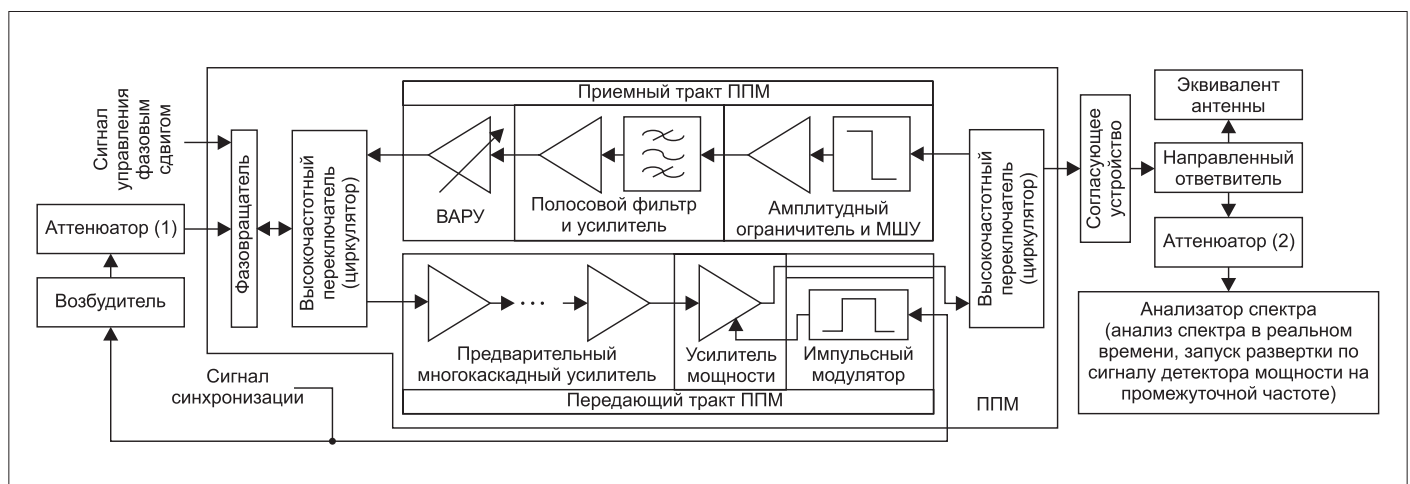


Рис. 3. Схема измерений для оценки характеристик кратковременного расширения занимаемой полосы при включении и выключении излучения ППМ

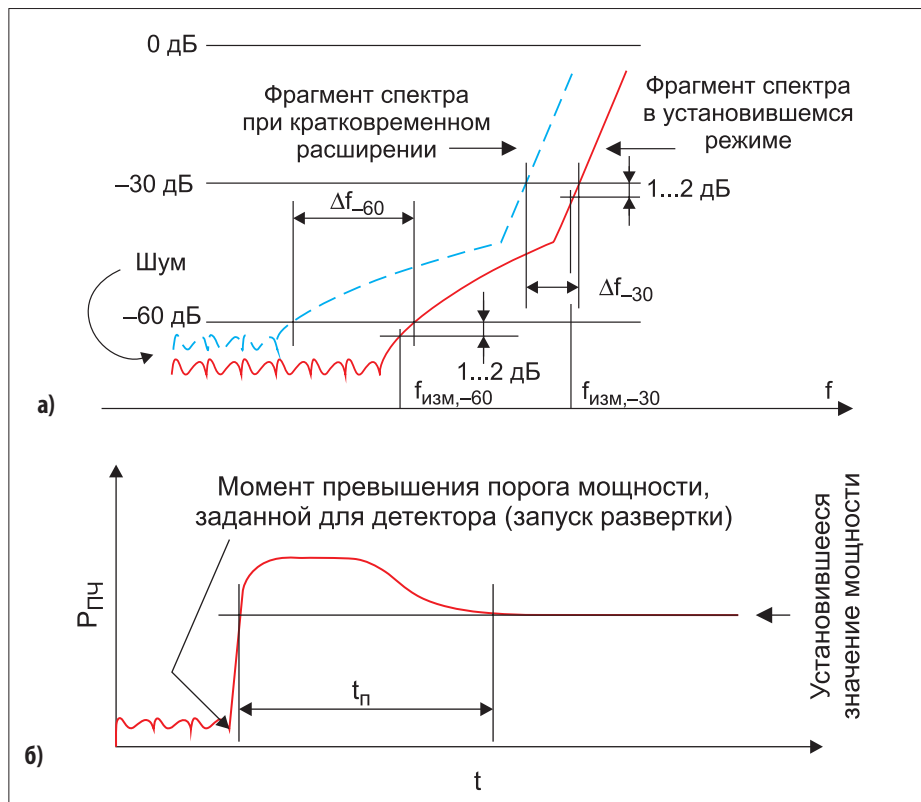


Рис. 4. Измерение характеристик кратковременного расширения занимаемой полосы при включении и выключении излучения ППМ: а) пораженной полосы частот; б) длительности поражения

поражения, т. к., очевидно, предыдущая схема измерения не будет работать. Помочь решить эту проблему может синхронизация развертки анализатора от внешнего источника при его работе в режиме с нулевой полосой обзора либо использование программной постобработки спектрограмм. Несколько смягчает это обстоятельство тот факт, что поражаемая при включении излучения полоса в подавляющем большинстве случаев существенно шире, чем при выключении.

Выполнение измерений по схеме, представленной на рис. 3, требует применения высококачественных анализаторов с возможностью анализа спектра в реальном времени, например, приборов серии R&S FSVR, R&S FSW.

III. Проникновение мощности из близко расположенных ВЧ-трактов. Связанным с этим явлением показателем ЭМС является допустимая мощность помехи при заданной частотной отстройке относительно полезного сигнала, которая должна быть не ниже установленной нормы. Ясно, что при работе приемного и передающего плеча ППМ значения названных показателей ЭМС будут отличаться друг от друга, поэтому они требуют раздельного измерения. Обычно в качестве помех рассматриваются узкополосные сигналы или аналоги тех, которые передает и принимает АФАР.

На рис. 5 представлена схема для измерений допустимой мощности помехи при работе ППМ в режиме приема. В качестве источника полезного сигнала может использоваться другой ППМ в режиме передачи

либо высококачественный векторный генератор, например R&S SMW200A, позволяющий в числе прочего формировать сигналы с ЛЧМ.

При инъекции помех во вход приемного плеча ППМ их мощность может на порядки превышать мощность полезного сигнала. Ввиду погрешностей согласования помехи могут оказывать столь существенное влияние на источник полезного сигнала, что это вызовет в нем недопустимые погрешности модуляции. В таком случае качество сигнала на выходе ППМ ухудшится, но причина этого заключается вовсе не в воздействии помех на приемное плечо ППМ. Для предотвращения таких эффектов источник полезного сигнала должен быть развязан от моста сложения. Это достигается введением в ВЧ циркулятора, обеспечивающего развязку до 30 дБ при прямых потерях до 1 дБ.

При использовании схемы на рис. 5 важно помнить, что многие виды циркуляторов рассчитаны на полосу не шире 10% от среднего значения рабочей частоты. Кроме того, в ряде случаев они предъявляют особые требования по согласованию и не могут работать при больших значениях коэффициента стоячей волны [2]. В обоснованных случаях целесообразно использовать многоступенчатые циркуляторы либо дополнять их вентилями с однонаправленной передачей радиочастотной мощности.

Собственно, принцип измерений предельно прост и состоит в повышении мощности сигнала помехи до появления нежелательных явлений во входном тракте. Цепи ВАРУ при выполнении измерений отключать не следует.

Анализ качества выходного сигнала осуществляется по возможности с использованием выходного устройства АФАР. Если сигнал одиночного ППМ не может быть правильно обработан выходным устройством, следует ввести критерии его качества, не привязанные к назначению АФАР. Например, таким критерием может быть отношение «сигнал/шум» либо мощность помехи на выходе аналогового тракта.

На рис. 6 представлена схема для измерения допустимой мощности помехи при работе ППМ в режиме передачи. Запуск цикла передачи осуществляется синхросигналом, который при необходимости может синхронизировать и развертку анализатора спектра либо иное устройство, предназначенное для анализа сигнала на выходе передающего плеча ППМ. В ряде случаев в качестве такового удобно использовать второй аналогичный ППМ в режиме приема, подключаемый через коаксиальный или волноводный тракт с требуемым ослаблением. Топология ВЧТ и, в частности, использование циркулятора обеспечивает защиту источника помехового сигнала от воздействия выходной мощности передающего плеча ППМ. Для формирования мешающего сигнала можно задействовать любой лабораторный генератор с низким уровнем гармоник, например R&S SMB100B. Назначение остальных элементов ВЧТ пояснено выше; принцип измерений также сохраняется.

IV. Пониженное качество питающего напряжения ППМ (ГОСТ 26807-86, МЭК61000-4-11). Электропитание ППМ может осуществляться и постоянным, и переменным напряжением в зависимости от места установки и назначения АФАР. Снижение качества питающего напряжения обычно формализуется в виде провалов и прерываний [11], в течение которых технические средства должны сохранять качество функционирования не хуже минимально допустимого. Еще одним возможным видом помех, свойственным сетям питания постоянного тока, являются периодические пульсации напряжения.

Из анализа системотехники и назначения ППМ следует, что наиболее энергоемкий режим соответствует работе передающего плеча, а перевод в режим излучения для всех ППМ осуществляется синхронно. При этом ситуация, когда часть ППМ АФАР работает на передачу, а часть — на прием, может наблюдаться только в весьма специфических приложениях. Ввиду этого в типовом случае наиболее глубокие провалы питающего напряжения наблюдаются в начале цикла излучения и сохраняются на некотором уровне в течение всей его длительности.

Для формирования провалов и, при необходимости, прерываний напряжения обычно используются схемы, в которых вначале напряжение требуемой формы создается задающим генератором, а затем оно через усилитель мощности подается на ППМ. Фор-

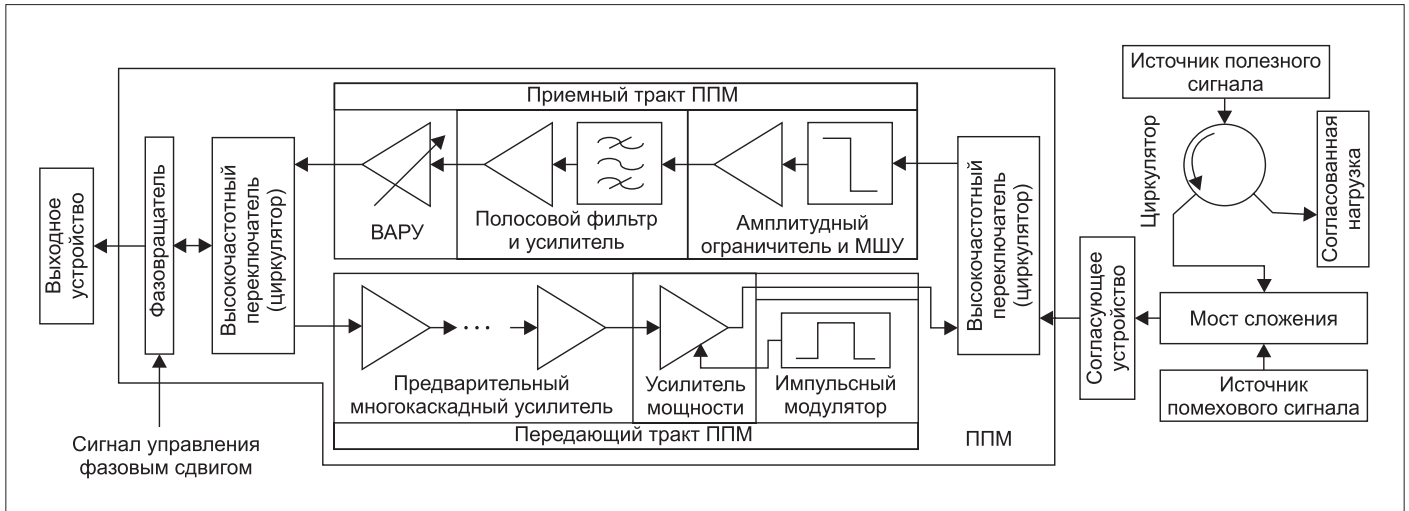


Рис. 5. Схема для измерения допустимой мощности помехи при работе ППМ в режиме приема

мирование провалов напряжения должно быть синхронизовано с цикличностью работы передающего плеча ППМ, что необходимо для имитации реальной электромагнитной обстановки. В силу этого требования задающий генератор должен быть составным устройством, имеющим возможность синхронизации по внешним сигналам. Усилитель мощности должен иметь пиковую нагрузочную способность, соизмеримую с аналогичной для штатной сети электропитания ППМ при их установке в АФАР.

Предлагаемая схема измерений представлена на рис. 7. Контроль качества функционирования передающего плеча ППМ должен осуществляться непрерывно, поскольку воздействие помех по цепям питания может иметь отложенный эффект, особенно при корреляционной обработке принятых сигналов в РЛС. Если в качестве устройства анализа выходного сигнала используется другой ППМ, то он должен быть охвачен синхронизацией, а при необходимости – и другими опорными сигналами.

V. Эмиссия помех в цепи заземления со стороны ППМ. Показателем ЭМС в этом случае является уровень формируемых ППМ помех. Для обеспечения повторяемости и воспроизводимости результатов измерений их проводят при нормированном импедансе в цепи распространения помех.

В практике измерений эмиссии кондуктивных помех по цепям питания для нормирования нагрузочного импеданса используются эквиваленты сети [7], которые характеризуются малым полным сопротивлением на частотах менее 1 кГц. К экранирующему корпусу ППМ обычно подключается один из полюсов питающего напряжения; при этом во многих случаях конструкция АФАР не имеет заземления в его классическом понимании. Схема измерений уровня эмиссии кон-

дуктивных помех со стороны ППМ в цепь заземления представлена на рис. 8. ППМ должен работать в штатном режиме, и можно ожидать, что наибольший уровень помех будет соответствовать работе его передающего плеча. Подключение ППМ к точке заземления выполняется через эквивалент сети или иное устройство с нормированным импедансом с максимально возможным приближением к реальным условиям эксплуатации. Кроме того, этот узел должен блокировать возможное поступление помех в цепь заземления ППМ из внешних источников.

В этой связи наилучшим решением является размещение испытательной установки в экранированном помещении и использование отдельного «чистого» заземления [12]. Измерения проводятся с использованием измерительного приемника с полосами пропускания, принятыми в измерениях по ЭМС.

VI. Восприимчивость к помехам по цепям заземления. В данном случае показателем ЭМС является значение инжектируемого тока или напряжения помех, при котором ППМ еще сохраняет свою работоспособность с качеством не ниже минимально заданного. Как и в предыдущем случае, импеданс в цепи распространения помех должен нормироваться. На рис. 9 показана соответствующая схема измерений.

Среди всех способов ввода помех наиболее применимым для цепей заземления является использование устройств связи/развязки (УСР), предполагающих гальваническую связь между точкой инъекции и источником помех [13]. Наиболее вероятно, что ППМ будет проявлять меньшую помехоустойчивость при работе приемного плеча. Для формирования помех заданного уровня можно использовать и стандартные лабораторные генераторы, и специ-

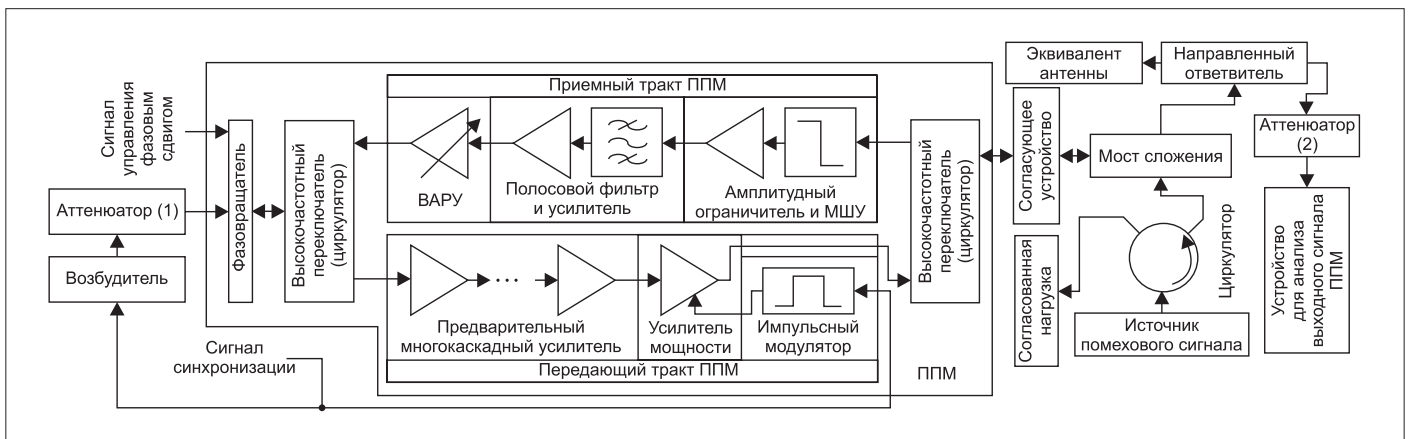


Рис. 6. Схема для измерений допустимой мощности помехи при работе ППМ в режиме передачи

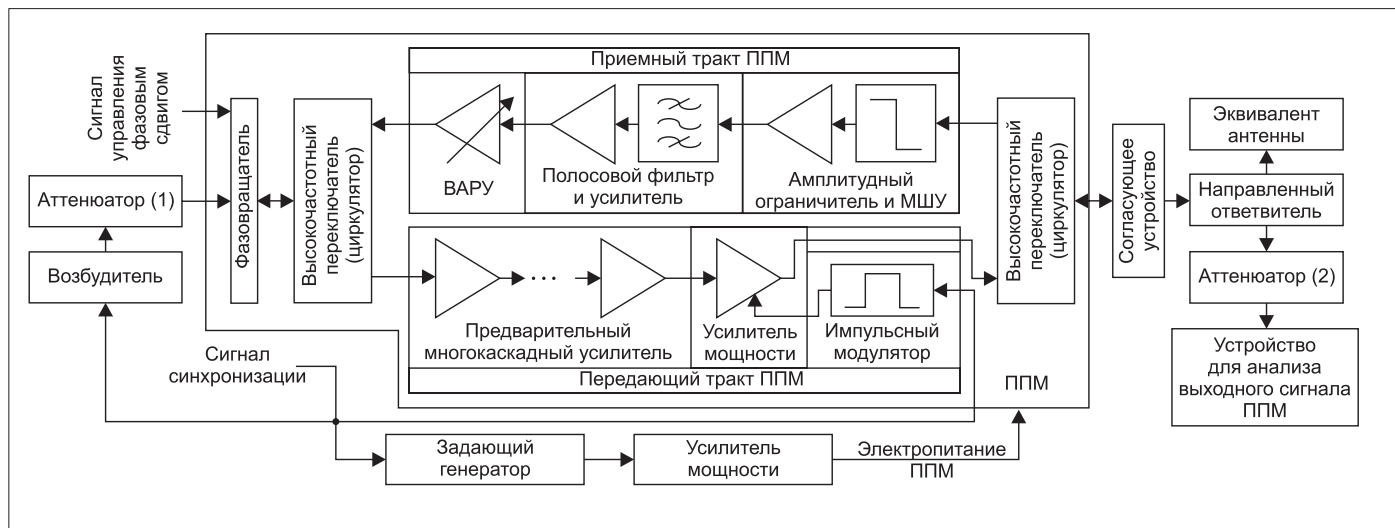


Рис. 7. Схема для измерений стойкости ППМ к пониженному качеству электрической энергии

альные, характеризующиеся повышенным значением выходного напряжения, применение которых может потребоваться при низком нагрузочном импедансе. При необходимости устройствами развязки оснащаются провода и кабели для подключения всех потенциально чувствительных устройств в составе схемы измерений. При необходимости источник полезного сигнала и выходное устройство могут быть охвачены синхронизацией или вспомогательными сигналами.

Все упомянутые показатели ЭМС могут проявлять зависимость от частоты помеховых воздействий. Полоса частот измерений определяется требованиями технического задания на разработку АФАР, а также стандартами, действующими в отношении конкретной области применения РТС. При этом можно считать, что у самой фазированной решетки — те же базовые проблемы ЭМС, что и у ППМ в ее составе. Следовательно, рассмотренные схемы измерений при соответствующей адаптации можно применить и к АФАР в целом, что соответствует следующему уровню укрупнения и тестирования на ЭМС. В этом случае нормы для показателей ЭМС будут, очевидно, другими.

Как следует из изложенного, в схемах измерений параметров ЭМС ППМ используется сравнительно мало стандартных средств измерений — генераторов сигналов и измерительных приемников или анализаторов спектра. Однако эти приборы играют основную роль в получении качественных результатов измерений, а также в обеспечении их воспроизводимости и повторяемости наряду с тщательностью соблюдения методик измерений [7].

Заметим, что измерения рассмотренных показателей ЭМС для ППМ требуют соблюдения ряда условий. С одной стороны, это штатный режим эксплуатации, с другой — соблюдение предписанных стандартов по ЭМС условий и средств измерений. Как и для технических средств других типов, при массовом тестировании ППМ целесообразно осуществлять предварительные измерения в менее жестких условиях, например вне безэховых камер. Такие измерения позволят выявить основные проблемы, например повышенную помехоэмиссию, до проведения финальных испытаний.

Тестирование ППМ по показателям ЭМС может потребовать подготовительных работ и расчетов. Объем и содержание этих работ, в первую очередь, определяется тем, что ППМ не являются самостоятельными изделиями, и для обеспечения их функционирования обычно используются специальные стенды, оборудование которых формирует необходимые сигналы управления и синхронизации, а также реализует требуемые виды модуляции. Отдельным вопросом является определение норм в отношении этих показателей и эксплуатационной электромагнитной обстановки, которое должно выполняться на основе расчетно-экспериментального подхода, а иногда и экспертных оценок.

Выводы

Проверка соответствия ППМ требованиям к ЭМС является важным условием достижения предельных выходных показателей работы

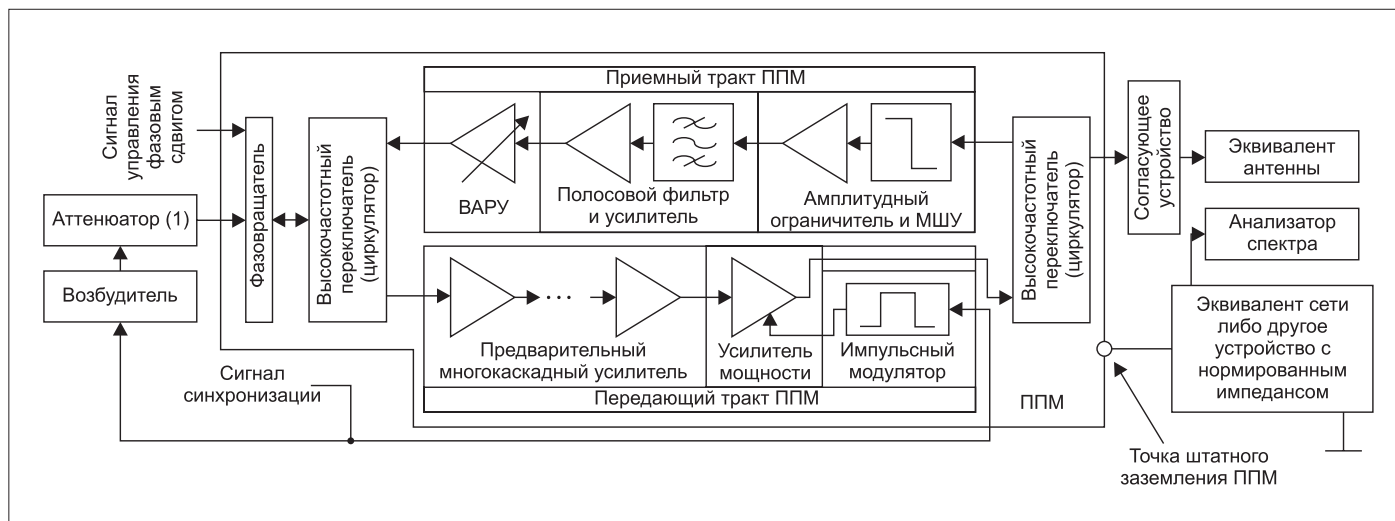


Рис. 8. Схема измерений помехоэмиссии со стороны ППМ в цепь заземления (показана работа передающего плеча ППМ)

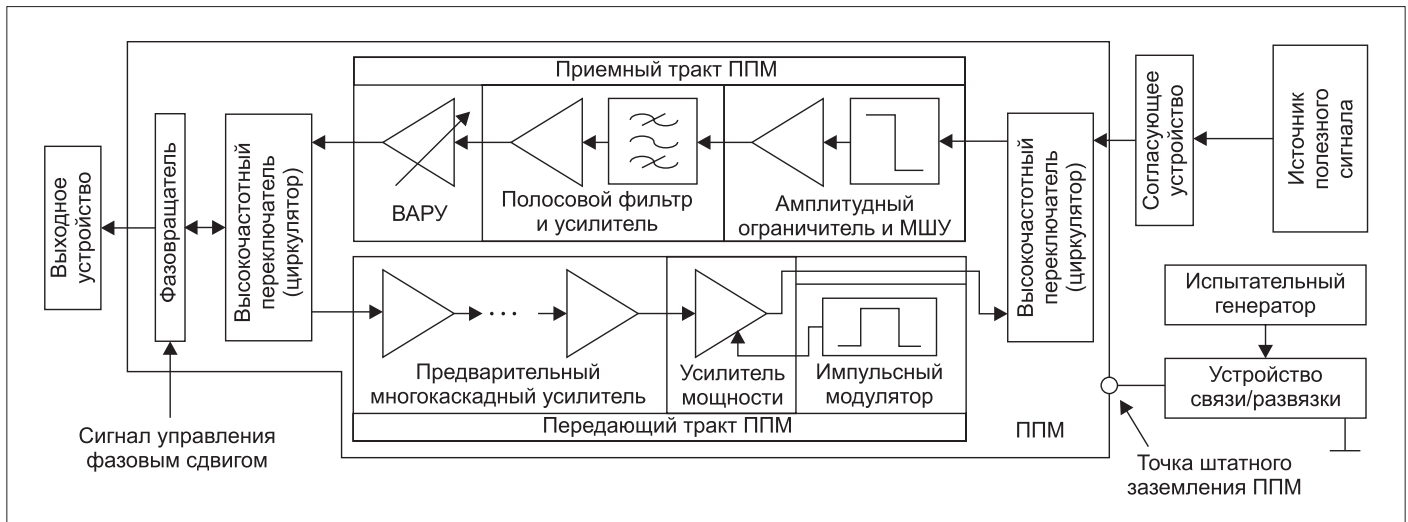


Рис. 9. Схема измерений помехоустойчивости по цепям заземления при работе приемного плеча ППМ

РТС, в которых используются АФАР на их основе. ППМ получают все большее распространение в изделиях гражданского назначения за счет меньшей стоимости элементной базы, компактности конструкции ППМ и повышения их энергоэффективности. Можно ожидать, что в ближайшей перспективе доля узлов систем связи, в которых применяются АФАР на основе ППМ, существенно возрастет. Одной из главных причин этого является использование все более широкополосных каналов связи, обеспечение которых частотным ресурсом требует перехода ко все более высоким частотам. На частотах выше 20 ГГц радиопролеты даже небольшой протяженности требуют сложной юстировки антенн из-за высокой направленности, которая нарушается из-за ветровых нагрузок и тепловой деформации конструкций в случае эксплуатации антенн классического типа. Применение АФАР позволяет решить эту проблему за счет автоматической коррекции положения оси диаграммы направленности, что уже закладывается в алгоритмы работы перспективных систем радиосвязи.

Таким образом, значимость методов и средств обеспечения ЭМС ППМ, а также измерения ее показателей будет только возрастать, а повышение общего объема испытаний требует тщательной проверки подходов к их проведению и их разумной оптимизации. ■

Литература

1. Братчиков А. Н., Васин В. И., Василенко О. О. и др. Активные фазированные антенные решетки. Под ред. Воскресенского Д. И., Канащенкова А. И. – М.: Радиотехника. 2004.
2. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. – М.: Связь. 1973.
3. Бузов А. Л., Быховский М. А., Васехо Н. В. и др. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Под ред. Быховского М. А. – М.: Эко-Трендз. 2006.
4. Феоктистов Ю. А., Матасов В. В. и др. Теория и методы электромагнитной совместимости РЭС. – М.: «Радио и связь». 1988.
5. Ширман Я. Д., Багдасарян С. Т., Маляренко А. С. и др. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Под ред. Ширмана Я. Д. – М.: Радиотехника. 2007.
6. Кечиев Л. Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. – М.: Грифон. 2019.
7. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. Пер. с англ. Кармашева В. С., Кечиева Л. Н. – М.: Издательский дом «Технологии». 2003.
8. Аветисян В. Г., Маркосян М. В., Оганесян А. А. и др. Тестирование модулей активной фазированной антенной решетки. (Сообщение 1. Методика тестирования). Известия НАН РА и ГИУА. Серия ТН 2007. Т. LX. № 3.
9. Лемешко Н. В., Водопьянов Г. В. Способ измерений параметров сигналов нисходящего канала базовой станции в сетях с временным разделением дуплексных каналов. Патент РФ № 2501026.
10. Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами РФ, утвержденная постановлением правительства РФ № 1049–34 от 21.12.11.
11. ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – М.: Стандартинформ. 2014.
12. Балюк Н. В., Кечиев Л. Н., Степанов П. В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.
13. ГОСТ Р 51317.4.6–99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, радиочастотным электромагнитным полям. Требования и методы испытаний». – М.: Госстандарт России. 2000.
14. ГОСТ CISPR 16–1–1–2016 «Требования к аппаратуре для измерения радиопомех и помехоустойчивости и методы измерения». – М.: Стандартинформ. 2017.
15. ФЗ РФ № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008.
16. www.rohde-schwarz.com.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 07/2020