

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАЗЪЕМОВ В СИСТЕМАХ ОБОРОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Среди множества областей, в которых используются коаксиальные СВЧ-кабели и соответствующие разъемы, оборонная отрасль является, пожалуй, наиболее требовательным сегментом существующего рынка. Именно в данной отрасли часто с техникой работают люди, которые не осознают, что СВЧ-кабели не просто расходные материалы, а сложные технические устройства. Их трудно винить за это, в конце концов, они солдаты, а не инженеры-электронщики. Однако именно из-за недооценки технической сложности СВЧ-кабелей такие устройства часто попадают под воздействие негативных факторов, начиная от переезда всевозможной техники, попадания на них химикатов, топлива или других реагентов и заканчивая использованием их в качестве тросов для буксировки тележек с оборудованием.

Несмотря на то что естественное старение и влияние окружающей среды являются основными причинами выхода из строя СВЧ-кабелей и разъемов, не следует недооценивать роль негативного воздействия, вызванного неправильным использованием или пренебрежительным отношением со стороны обслуживающего персонала. Согласно последним оценкам, около 75% СВЧ-кабелей подлежат замене уже через относительно небольшой срок эксплуатации, причем 35% из них меняются по крайней мере раз в год, а 20% не реже двух раз в год.

В потребительском сегменте СВЧ-кабели и разъемы имеют относительно невысокую стоимость и, по сути, считаются расходным материалом. Однако все обстоит иначе, когда дело касается оборонного и аэрокосмического направлений, где данные компоненты не только имеют куда более высокие требования и стоимость, но и могут стать тем фактором, от которого зависит жизнь и здоровье людей. В связи с этим уже в течение многих лет компании-производители неустанно публикуют инструкции, статьи и обучающие видео для своих клиентов о том, как правильно «заботиться» об их продукции.

За время своего существования СВЧ-кабели и разъемы приобрели множество форм и претерпели немало изменений. Производители добились больших успехов в повышении прочности и надежности данных устройств: от специальных защитных оболочек кабелей, непроницаемых для опасных веществ, и заканчивая разъемами, способными выдерживать огромное количество циклов подключения/отключения. Все это стало возможным благодаря научным достижениям в электротехнике и машиностроении.

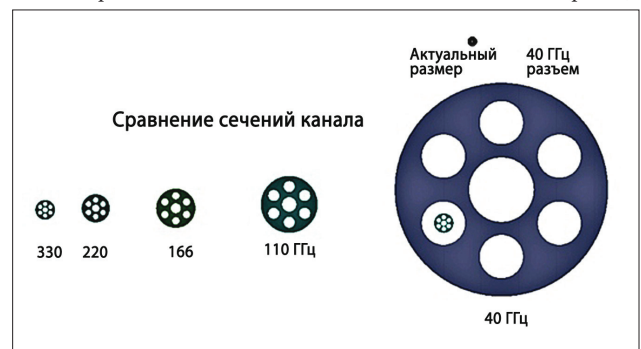
Помимо высокой надежности и стойкости к внешним воздействиям, СВЧ-кабели и разъемы должны иметь минимально возможные вносимые потери и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), высокую стабильность сигнала, способность сохранять свои характеристики в широком диапазоне температур, а также высокую устойчивость к воздействию внешних сигналов. Особенно сложно добиться соответствия данным требованиям, когда дело касается кабелей и разъемов, предназначенных для работы в диапазоне миллиметровых волн.

Это далеко не первый случай, когда оборонная промышленность сталкивается с подобными проблемами: используемые для работы частоты неумолимо растут, а с появлением 5G даже коммерческие беспроводные сети вероятно будут работать на частотах до 60 ГГц или выше. Конечно, уже много лет существуют СВЧ-кабели и разъемы, предназначенные для работы на частоте 60 ГГц, однако если дело касается 100 ГГц и более, у таких компонентов значительно возрастает не только цена, но и сложность производства. К тому же отдельной задачей становится их оптимизация для использования в оборонном и других специальных сегментах рынка.

ОТ ПЛАНИРОВАНИЯ ДО РЕАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для составления эффективного плана производства продукта (дорожной карты) компании, занятых изготовлением устройств, функционирующих в радиочастотном и СВЧ-диапазонах, должны обладать по крайней мере двумя основными качествами: умением провести грамотный анализ рынка и, как это ни странно, ясновидением. Причем первый пункт полезен лишь в некоторой степени, что обусловлено высокой сложностью прогнозирования и определения того, что понадобится клиентам через пять или более лет: именно столько в среднем нужно для разработки продукта, прохождения испытаний и начала серийного выпуска.

В дополнение к самим устройствам производитель должен обеспечить доступ клиентов к калибровочным комплексам, а также к необходимым для работы пассивным компонентам — разъемам, адаптерам и кабелям. При производстве устройств для работы на высоких частотах пассивные компоненты для них приобретают достаточно высокую стоимость и часто вызывают проблемы, связанные с надежностью при эксплуатации в полевых условиях. Так, если разъемы SMA, TNC и другие, схожие по типоразмерам, требуют достаточно бережного отношения к себе, то 1 мм-разъемы и вовсе представляют совершенно новую парадигму. Для справки, если сечение канала в разъемах типа N (Type-N) достигает 3,04 мм, то для 0,8-мм разъемов, это значение составляет лишь 0,347 мм, а для 0,6- и 0,4-мм разъемов и вовсе 0,26 и 0,174 мм соответственно (рис. 1).



▲ Рис. 1. Сравнение сечения канала в разъемах, предназначенных для работы на различных частотах. Источник: Anritsu

Разработка и производство СВЧ-разъемов долгое время шли в ногу с потребностями клиентов, что в значительной мере обязано самим производителям данных устройств. Такие компании, как Keysight Technologies (ранее Agilent Technologies, а до этого Hewlett Packard), Anritsu (ранее Wiltron), Rohde & Schwarz, принадлежат к числу самых именитых производителей СВЧ-разъемов и принесли в данную отрасль немало достижений, новых концептов и технологий.

РАЗЪЕМЫ СВЧ В АВИОНИКЕ

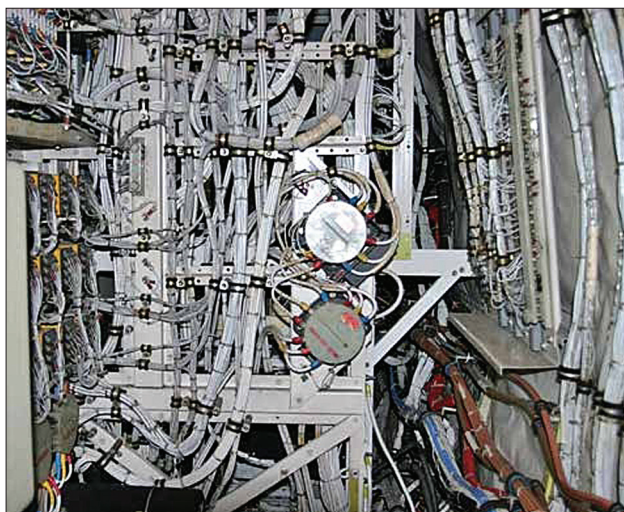
Авионика является, пожалуй, одной из наиболее требовательных областей для кабелей и разъемов всех типов и форм. Компоненты, используемые в данной области, должны соответствовать широкому перечню регламентов, что неудивительно, ведь от их работоспособности может зависеть жизнь пилота и целостность летательного аппарата. Требования в авионике мало чем отличаются от нормативов оборонного сегмента или космической отрасли и предусматривают не только обязательное наличие надежной коаксиальной структуры кабеля, но и, например, добавление специальных слоев для поддержания его импеданса на постоянном уровне. Еще одно ключевое условие — стабильность параметров кабеля в широком диапазоне температур. К другим требованиям также можно отнести пароиоляцию, стойкость к перетиранию и наличие разного типа оболочек.

Одна из проблем работы с коаксиальными кабелями в авионике заключается в том, что инструменты, необходимые для поиска разрыва кабеля или измерения каких-либо его параметров, не всегда доступны там, где это нужно. И даже если такой инструмент имеется, работа с ним может потребовать присутствия технического специалиста с соответствующим уровнем знаний и практического опыта. Кроме того, такие инструменты и системы стоят дорого, что усложняет их повсеместное использование. В итоге испытательное и измерительное оборудование для работы в подобных сферах куда логичнее свести к результату наподобие «есть ошибка/нет ошибки», возможно, определению ее местонахождения, а также предполагаемой причине возникновения. Для разъяснения данной концепции рассмотрим один из гипотетических сценариев.

Как уже говорилось, практически любой современный летательный аппарат представляет собой сложную систему с огромным количеством различного оборудования, размещенного по всему фюзеляжу (рис. 2). Для примера предположим, что характеристики системы РЭБ (радиоэлектронной борьбы), радиоэлектронного противодействия (РЭП) или системы связи в военном истребителе ухудшаются или вовсе вышли из строя. Один из способов решения данной проблемы — заменить составляющие данных систем или их блоки целиком. Если замена не помогла и отсутствуют повреждения на антеннах воздушного судна, остается проверить расположенные на борту кабели и соответствующие разъемы.

Следующий шаг — поиск места разрыва. Для этого с помощью специального оборудования, такого как портативный (или настольный) векторный анализатор цепей (ВАЦ) или целая система наподобие Textron Joint Service Electronic Combat Systems Tester (JSECT), определяется расстояние до неисправности. Его измерение поможет значительно ускорить поиск места разрыва, который часто находится в точке соединения кабеля и разъема. Данный разрыв достаточно просто исправить, удалив поврежденный участок и установив новый разъем.

Все это звучит довольно просто, однако при работе на борту самолета может стать суровым испытанием, требующим от оператора навыков спелеолога, техника и хирурга одновременно, поскольку часто проблемная зона кроется глубоко внутри корпуса и может быть недоступна без снятия определенных деталей фюзеляжа. Конечно, если повезет, разрыв удастся легко обнаружить и исправить, заменив разъем, но так бывает далеко не всегда.



▲ Рис. 2. Внутреннее устройство воздушного судна — определено не то место, где просто найти неисправность и провести ремонт кабеля или разъема

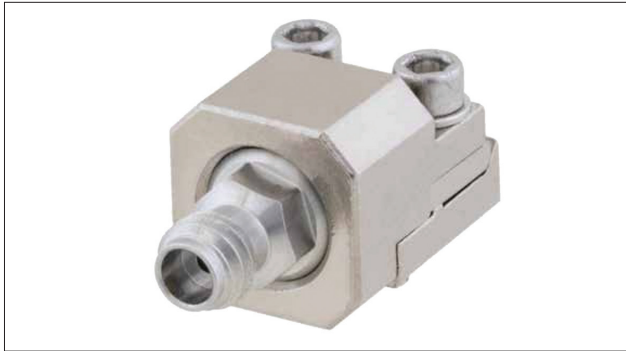
Устранение разрыва заменой поврежденного участка и разъема делает возможным ремонт простых кабелей связи, однако кабельные коаксиальные СВЧ-сборки, как правило, изготавливаются в виде единого целого, чтобы обеспечить оптимальную производительность на участке соединения кабеля и разъема. Кроме того, кабель имеет несколько защитных слоев, включая пароиоляцию, что делает ремонт разрыва с условием сохранения прежних эксплуатационных характеристик практически невозможным.

Это лишь один из вероятных сценариев, в котором источником проблемы становится кабель или разъем (или и то и другое одновременно). Однако данный пример прекрасно иллюстрирует то, какое количество времени и сил необходимо потратить для решения проблемы, связанной с кабелем, и почему важно понимать, что СВЧ-кабели и разъемы — это не просто расходные материалы, а важные компоненты системы, способные улучшить ее работу или, наоборот, вывести из строя. Особенно неприятным моментом является сценарий, когда после исправления и проверки отремонтированный кабель устанавливают обратно на воздушное судно, и затем приходит понимание, что проблема не была решена или на ее месте возникла новая и придется снова все разбирать.

ЧЕМ ВЫШЕ ЧАСТОТЫ, ТЕМ БОЛЬШЕ ПРОБЛЕМ

Описанная ситуация с СВЧ-кабелями и разъемами вряд ли улучшится в ближайшем будущем, поскольку современные системы переходят на работу с миллиметровым диапазоном волн, компоненты для которого имеют куда более миниатюрные размеры и обладают высокой хрупкостью и стоимостью. Так, достаточно традиционный разъем TNC или Type-N куда массивнее 1-мм и 0,8-мм разъема. Проблема заключается в том, что на столь высоких частотах даже небольшое повреждение центрального провода, едва видимое невооруженным глазом, может значительно ухудшить характеристики всей системы.

Первый 1-мм разъем, который превысил планку рабочей частоты в 100 ГГц, был выпущен на рынок в далеком 1989 году. Данный разъем не имеет модовых частот до 110 ГГц и является инновационным с механической точки зрения, выходя за пределы допусков из-за своих крошечных размеров (рис. 3). Одно из новшеств, применяемых в таком разьеме и изначально присваиваемых компании Omni-Spectra — так называемый самосочлающийся соединитель, позволяющий подключать целую подсистему с несколькими разъемами к другой такой же, без необходимости использования промежуточного кабеля, что значительно упрощает построение сети.



▲ **Рис. 3.** Концевой 1-мм разъем Pasternack, модель 45403, работает на частотах 110 ГГц с КСВН 1,28:1 или меньше, вносимые потери 0,1 дБ

Создав действительно миниатюрные разъемы, способные работать на частотах до 110 ГГц, производители встали перед проблемой их диагностики и применения векторных анализаторов цепей для поиска неисправностей. Решение удалось найти после разработки 0,8-мм разъема компанией Anritsu, который действует на частотах до 145 ГГц и создан с возможностью работы с новейшим анализатором цепей компании. Сам разъем настолько мал, что его почти невозможно увидеть без микроскопа, но все же достаточно велик, чтобы с ним проводить какие-либо манипуляции. Поскольку разъем изготовлен из высокотемпературного материала, он выдерживает кратковременное температурное воздействие до +200 °С.

При создании 0,8-мм разъема изначальная задача заключалась в разработке компонента с высокой степенью согласования импеданса, который имел бы итоговое отклонение всего в 3%. В результате получился разъем, способный функционировать на частотах вплоть до 170 ГГц, однако при работе с коаксиальным кабелем поиск неисправностей возможен только на частотах до 145 ГГц. Кроме того, требовалось создать собственные кабели и адаптеры для выполнения калибровки.

НАСКОЛЬКО МАЛЕНЬКИМИ МОГУТ БЫТЬ СВЧ-РАЗЪЕМЫ?

Покойный Билл Олдфилд, работавший в компании Wiltron, а затем в Anritsu и известный как один из новаторов в области разработки разъемов для СВЧ, в одном из своих докладов заявил, что создание разъемов с сечением канала меньше 0,8 мм вполне возможно, и предложил скорое создание 0,6- и даже 0,4-мм разъемов.

Однако хотя теоретически такие разъемы действительно можно спроектировать, их серийное производство вряд ли

удастся воплотить в жизнь: любые частички грязи или даже пыль, слишком маленькие, чтобы их можно было разглядеть, будут влиять на работу этих устройств, а их соединение и отключение превратилось бы в сущий кошмар, который бы пришлось воплощать в условиях, близких по стерильности к хирургическому отделению.

СВЧ-разъемы прекрасно подходят для диапазонов до 100 ГГц, и хотя оборонная промышленность твердо нацелена на скорое создание приложений, работающих в терагерцевых диапазонах, сложно представить что разъемы, работающие в данных диапазонах, можно было бы изготовить в достаточном количестве по цене, которую сможет позволить себе Министерство обороны или любая другая правительственная организация. К счастью, на столь высоких частотах, где электромагнитная энергия приближается к области световых волн, вместо привычных коаксиальных кабелей и разъемов предполагается использовать высокоинтегрированные SoC, содержащие весь необходимый цифровой и аналоговый функционал.

Данное явление уже можно наблюдать на гораздо более низких частотах, и с применением других полупроводниковых материалов без необходимости использования коаксиальных кабелей и разъемов. Уже сейчас существуют обозначения волноводов для терагерцевого диапазона (WR-051), а, например, волновод WR-3, охватывающий диапазон 220–330 ГГц, имеет сечение всего 0,8×0,4 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диапазон частот 145–300 ГГц несет в себе множество возможностей, и оборонная промышленность твердо намерена его освоить. Однако очевидно, что работа на столь высоких частотах требует наличия соответствующих устройств и компонентов. И хотя уже сейчас становится возможным перешагнуть порог в 145 ГГц за счет специальных расширителей диапазона, применение для работы в нем коаксиальных кабелей и разъемов малоцелесообразно.

С практической точки зрения кажется, что размеры высокочастотных разъемов стали настолько миниатюрными, что дальнейшее их уменьшение вряд ли возможно. Тем не менее, когда военным, министерству связи или какой-либо другой структуре требуется повысить производительность и разработать новое решение, границы возможностей могут быть сдвинуты, что создает серьезный стимул для развития и обновления отрасли высокочастотных технологий. ■