

## Решения для кабельных сборок СВЧ-диапазона

Владимир РЕНТЮК  
rvk.modul@gmail.com

**В статье рассматриваются современные решения для кабельных сборок, используемых в оборудовании, работающем в области высоких и сверх-высоких частот, на примере поставок компании Molex.**

Еще в конце 90-х аппаратура, работающая в гигагерцовом диапазоне частот, была не то чтобы редкостью, но в большей части чем-то специфическим. Она предназначалась, в основном, для медицины, радиолокационных целей или специальных применений, но потихоньку внедрялась и на более широкие рынки сбыта. Причина этого продвижения, которое в наше время стало носить массовый характер, в появлении не только специальных, привычных разработчикам в этой области техники гибридных сборок и недорогих полупроводниковых приборов, но и интегральных микросхем. Широкодоступными стали и специальные материалы, предназначенные для этой области частот, расширился их ассортимент, снизилась цена. Еще одним немаловажным фактором стало упрощение процесса разработки таких устройств, поскольку появились достаточно мощные симуляторы, значительно снижающие ошибки при проектировании, сокращающие время проведения НИОКР и общие затраты.

Чем же так притягивает разработчиков в общем-то достаточно сложная для проектирования область частот не только в единицы (мобильная телефония, навигация), но и в десятки (спутниковое телевидение, беспроводные сети) гигагерц? Причин несколько, но главное — это малые габариты таких устройств, их эффективность и, как это ни странно, их простота. Для передатчиков, работающих в рассматриваемом диапазоне, не требуется большая мощность, зачастую достаточно единиц милливатт (при этом не нужно получать разрешение на использование оборудования). В этом диапазоне еще не так заметен «частотный голод», поскольку достигается большая плотность каналов, имеется возможность передачи широкополосных сигналов (телевидение) и использования прогрессивных видов помехоустойчивой модуляции. Сами устройства и, что еще более важно, их антенны имеют малые габариты. Все это касается как передатчиков, так и приемников. Можно с уверенностью прогнозировать, что этот рынок будет развиваться дальше все более и более динамично. По-прежнему актуальными остаются также

рынки аэрокосмической техники и вооружений, измерительного оборудования и медицины.

Успехи в области схемотехники и комплектующих для высокочастотного и сверх-высокочастотного оборудования несомненны, но проблема, как всегда, скрывается в мелочах. Прежде всего, это кабели и разъемы. Дело в том, что сборки модулей этой аппаратуры являются технически и технологически достаточно совершенными, по большей части эту работу выполняют автоматы, а они ошибок, как правило, не делают, и изделия выходят с высокой степенью идентичности. Но между модулями (например, между выходным каскадом передатчика или входной цепью приемника и антеннами) имеется кабель, который обычно подключается при помощи разъемов. Вот здесь и возникает проблема. Неправильно выбранный кабель — причина не только рассогласования линии связи, но и потерь мощности сигнала. Для передатчика это снижение КПД из-за роста коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН, в техническом обиходе — КСВ), для приемника — снижение чувствительности. Сам разъем вносит свой вклад в увеличение КСВН, но неправильно заделанный разъем представляет собой проблему значительно большего масштаба, причем еще и непрогнозируемую. Поскольку операции изготовления кабелей не могут быть в достаточной мере автоматизированы, здесь нельзя исключать человеческий фактор: появляются ошибки, снижается качество и повторяемость параметров.

Разделим эту проблему на две: сам кабель и его сборка. Компания Molex, больше известная на рынке своими разъемами, которые стали уже мировым эталоном, предлагает решения и в этой области. В 2013 г. компания вывела на рынок две серии кабелей под торговой маркой Temp-Flex. Первая серия (рис. 1) — это кабели с литой внутренней изоляцией, предназначенные для использования в радиолокационном оборудовании, ракетной технике, тяжелом колесном вооружении, а также в космической технике. Стабильность фазовых и частотных характеристик и малые потери обеспечивает ис-

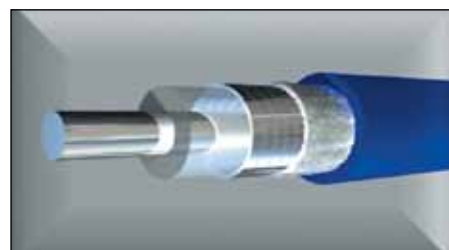
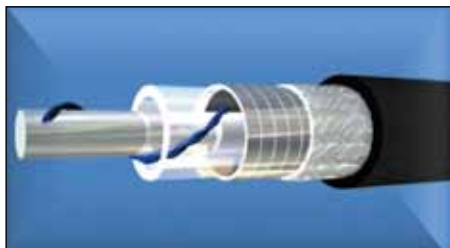


Рис. 1. Коаксиальный СВЧ-кабель серии Temp-Flex типа Solid-Core Low-Loss, отличающийся малыми потерями и VOP 70%

пользование современных материалов и технологий.

Кабели предлагают с VOP (Velocity of Propagation — коэффициент замедления, величина, обратная принятому у нас коэффициенту укорочения), равным 70%. Они имеют высокоэффективное экранирование, обеспечивают минимальное собственное излучение и надежную защиту сигналов в кабеле от воздействия внешних электромагнитных помех. Центральный проводник кабеля выполнен из посеребренного медного проводника (он может быть одно- или многожильным). Калибр (диаметр) проводников от 31 до 19 AWG (AWG — американская система калибров American Wire Gauge). Внутренняя изоляция кабеля Temp-Flex Solid-Core выполнена из фторполимера FEP высокой чистоты (FEP — Fluorinated Ethylene-Propylene, распространённая торговая марка Teflon компании DuPont). Внешняя изоляционная оболочка — FEP или полиуретан (опционно).

Соблюдение и обеспечение точных геометрических размеров, а также тщательный электрический контроль параметров кабеля в процессе производства гарантируют его минимальный КСВ и малые вносимые собственные потери. Рабочий частотный диапазон такого кабеля до 35–112 ГГц (зависит от типоразмера кабеля). Двойное экранирование плоским медным посеребренным проводником и медной посеребренной оплеткой обеспечивает эффективность не менее чем в 100 дБ. Волновое сопротивление кабеля стандартное —  $(50 \pm 1)$  Ом (возможен заказ



**Рис. 2.** Коаксиальный СВЧ-кабель с воздушным диэлектриком серии Temp-Flex типа Air-Dielectric Ultra-Low-Loss, отличающийся малыми потерями и VOP в пределах 85–88%

кабеля и с волновым сопротивлением, равным 75 Ом). Погонная емкость кабелей этого типа 29 пФ/фут. Кабели могут монтироваться с высокочастотными и радиочастотными соединителями типов SMA, SMP, SMPM, 2,92 мм, 2,4 мм.

Второй тип Temp-Flex — гибкие коаксиальные кабели с малыми уровнями потерь (рис. 2).

Кабель этого типа сконструирован на базе запатентованной конструкции фиксации центральной жилы в условиях использования внутренней воздушной изоляции. Это повышает стабильность его фазовой характеристики. Как и предыдущий тип кабеля, он имеет центральный проводник из посеребренного медного проводника (может быть одно- или многожильным). Калибр (диаметр) проводников 31–19 AWG. Внешняя изоляция кабеля Temp-Flex Air-Dielectric выполнена из фторполимера FEP высокой чистоты, но его основная внутренняя изоляция — воздух. Такой диэлектрик обеспечивает лучшую фазовую стабильность по сравнению с PTFE (политетрафторэтилен, наш аналог — фторопласт-4) и ePTFE (длинноцепочечный политетрафторэтилен), используемые конкурентами компании Molex. Причина в том, что фторопластам даже при комнатной температуре присущи некоторые проблемы, возникающие за счет перехода молекулярной фазы.

Двойное экранирование плоским медным посеребренным проводником и медной посеребренной оплеткой обеспечивает эффективность экранирования рассматриваемого кабеля в 100 дБ и более. Коэффициент замедления кабеля VOP (до 88%) с одновременным обеспечением минимального KCB — один из самых высоких показателей в отрасли для современных СВЧ-кабелей. Рабочий частотный диапазон такого кабеля до 110 ГГц (зависит от типоразмера кабеля). Волновое сопротивление стандартное: (50 ± 1) Ом (возможен заказ кабеля и с волновым сопротивлением, равным 75 Ом). Погонная емкость кабелей этого типа зависит от типоразмера и приведена в спецификациях. Кабели могут монтироваться с высокочастотными и радиочастотными соединителями, такими как SMA, 2,92-мм, 2,4-мм. По своим характери-

стикам эти гибкие микроволновые коаксиальные кабели являются уникальным предложением в данном сегменте рынка.

Оба рассматриваемых типа кабелей соответствуют требованиям директивы RoHS, и хотя действие этой директивы не распространяется на изделия военного назначения, это важное замечание, поскольку область применения директивы постоянно расширяется [1]. При необходимости могут быть поставлены кабели с безгалогеновым изоляционным покрытием (так называемые Halogen-free кабели, необходимые для некоторых применений). Кабели рассматриваемого типа соответствуют требованиям по пожаростойкости класса V-0 (UL 1351), диапазон их рабочих температур –65...+125 °С. При заказе кабелей необходимо учитывать, что они выполнены в дюймовом размерном исполнении. Более подробная информация имеется на сайте [2].

Благодаря опциональной возможности заказа кабелей со смонтированными разъемами их можно использовать в различных приложениях, включая аэрокосмическую и оборонную отрасли, а также в средствах измерений и контроля.

Что касается сборки, она включает в себя мерную порезку кабеля, зачистку, подготовку, установку разъема (это может быть простая фиксация, обжимка или опайка). Для СВЧ-кабелей крайне важно соблюдение их геометрических размеров, а именно — длины, поскольку она определяет время задержки распространения сигнала в кабеле, что в ряде случаев влияет на согласование. Качество установки разъема, особенно в рассматриваемой области частот, оказывает большое влияние на KCB кабельной сборки. На всех операциях требуется высокая точность, их нельзя доверить неподготовленному персоналу. К тому же сборка кабеля требует наличия специального оборудования, инструмента и средств контроля. Все это весьма и весьма дорого. Какой же выход? Выход в использовании «золотого правила» хорошего разработчика: «все, что может быть куплено для использования в новом проекте, должно быть куплено, а разрабатывается то, что не продается». Это сокращает и время выхода изделия на рынок, и затраты на его разработку и изготовление. Компания Molex как раз и предоставляет такую услугу, причем услугу профессиональную.

При рассмотрении примеров современных СВЧ-кабелей было упомянуто, что опционно кабели могут поставляться в виде готовых сборок. Как это выглядит? К примеру, компания Molex предлагает высококачественные гибкие микроволновые кабельные сборки, которые позволяют заменить жесткие и полужесткие неудобные в установке сборки. Предлагаемые сборки изготовлены из коаксиальных кабелей серии Temp-Flex и высококачественных радиочастотных соединителей компании Molex. Такие сборки обеспечивают



**Рис. 3.** Гибкие кабельные сборки с использованием кабелей серии Temp-Flex типа Solid-Core Low-Loss и Air-Dielectric Ultra-Low-Loss

превосходные электрические характеристики и собраны с использованием собственных методик компании, минимизирующих KCB и вносимые потери в оптимальной для данного кабеля и разъема комбинации. Варианты включают в себя разъемы типа SMA, 2,92-мм, SMP, SMPM и др. Примеры исполнения кабельных сборок представлены на рис. 3.

Такие сборки, благодаря примененной компанией Molex технологии, обеспечивают стандартное волновое сопротивление с погрешностью, не превышающей погрешность волнового сопротивления самого кабеля, а именно ±1 Ом. При этом сохраняется высокий коэффициент экранирования (подавление собственного и внешнего излучения не менее 100 дБ), для кабелей типа Solid-Core Low-Loss обеспечивается минимальный KCB, а для кабелей типа Air-Dielectric Ultra-Low-Loss — минимально возможные потери. Специальная проверка качества заделки выводов гарантирует высокое качество сборки. Стандартные конфигурации сборок, доступные для заказа, приведены в таблице 1.

Это полностью законченные высококачественные комплектные кабельные сборки, доступные в настоящий момент. В ближай-

**Таблица 1.** Стандартные конфигурации сборок Molex

Тип разъема	Ориентация разъема	Кабель Temp-Flex Solid-Core Low-Loss*			Кабель Temp-Flex Air-Dielectric Ultra-Low-Loss*		
		0475C-2901	0865C-2401	1415C-1901	047-2801	086-2201	141-1701
Розетка SMPM	Прямой	X	X		X	X	
	Угловой	X	X		X	X	
Розетка SMP	Прямой	X	X	X	X	X	X
	Угловой	X	X	X	X	X	X
Вилка SMA	Прямой	X	X	X	X	X	X
	Угловой	X	X	X	X	X	X
Розетка SMA	Прямой	X	X	X	X	X	X
Вилка 2,92 мм	Прямой	X	X	X	X	X	X
Вилка 2,4 мм	Прямой	X	X		X	X	
Вилка Тип N	Прямой		X	X		X	X
Розетка TNC	Прямой	X	X				

**Примечание.** \* — Номера кабельных сборок условные, на сайте [molex.com](http://molex.com) не опубликованы.

Таблица 2. Характеристики стандартные кабельных сборок Molex

№ сборки*	Импеданс, Ом	VOP, %	Погонная емкость, пФ/фут	Радиус изгиба (min)	Центральный проводник	Внутренняя изоляция	Оболочка	Внешний диаметр	Граничная частота, ГГц
047SC-2901	50+1	70	29	0,2"	0,0113"	FEP	FEP	0,056"	112
086SC-2401				0,3"	0,0201"			0,101"	62
141SC-1901				0,5"	0,036"			0,157"	41
047-2801		87	23,3	0,2"	0,0126"			0,055"	143
086-2201		86,4	23,6	0,38"	0,0253"			0,101"	72
141-1701		87	23,3	0,75"	0,0453"			0,158"	42

Примечание. \* — Номера кабельных сборок условные, на сайте [molex.com](http://molex.com) не опубликованы.

Доступный на настоящий момент ряд кабельных сборок по длине: 152,4; 228,6; 304,8; 381; 457,2; 3048 мм. Полная информация по рассматриваемым кабельным сборкам и номера заказов имеются на сайте [3].

### Литература

1. Рентюк В. RoHS-директива — защита экологии или рынков? // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 5.
2. [www.molex.com/link/solidcore.html](http://www.molex.com/link/solidcore.html)
3. [www.molex.com/link/flexiblemicrowavecables.html](http://www.molex.com/link/flexiblemicrowavecables.html)

В будущем число доступных стандартных опционных разъемов будет увеличено. Ряд общих характеристик рассмотренных выше кабельных сборок приведен в таблице 2.