

КОАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ СВЧ-ДИАПАЗОНА



Л. Белов
belovla@post.ru

При создании и испытании любой аппаратуры СВЧ-диапазона необходимо обеспечивать соединение электронного блока с источником сигнала, с другими блоками, с антенной, нагрузкой. Соединение должно быть согласовано с подключаемыми блоками во всей полосе частот сигнала и в диапазоне изменения дестабилизирующих внешних факторов. При низком качестве согласования часто не удается реализовать потенциальные возможности радиосистемы, тогда как высокое качество позволяет снизить требования, предъявляемые к функциональным узлам аппаратуры. Поэтому ведущие производители электронных узлов уделяют серьезное внимание качеству соединителей (разъемов) и готовых кабельных отрезков, сочлененных с ними. Цена соединителей в условиях жесткой конкуренции часто превышает цену сложных электронных узлов. Вот почему современный уровень пассивных компонентов этого типа представляет особый интерес. А отечественным разработчикам полезно познакомиться с возможностями совершенствования электронных устройств и освоения диапазона миллиметровых длин волн.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОАКСИАЛЬНЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Современные модели коаксиальных радиочастотных соединителей характеризует множество сочетаний параметров. Это – диаметр коаксиального кабеля, наибольшая рабочая частота, технические и эксплуатационные характеристики, особенности и варианты присоединения к высокочастотной

схеме, к корпусу блока, сочленения центральной жилы и коаксиальных контактов. К наиболее важным электрическим и эксплуатационным параметрам радиочастотных соединителей относят следующие:

- **волновое сопротивление.** Чаще всего применяются узлы с импедансом согласования 50 Ом; отдельные модели рассчитаны на сопротивление 75 Ом. Волновое сопротивление специализированных соединителей для двухпроводных линий составляет 78–130 Ом;
- **диапазон рабочих частот.** Наибольшее значение – от постоянного тока до 65 ГГц без резонансных явлений;
- **коэффициент стоячей волны KCB (VSWR);**
- **коэффициент потерь** в прямом направлении (Insert Loss – IL). Этот параметр зависит от частоты, и для большинства изделий справедлива оценочная формула $IL = 0,03 \sqrt{f}$, где рабочая частота f выражена в гигагерцах;
- **диапазон рабочих температур** окружающей среды. Наибольший – от -65 до 165°C;
- **уровень паразитного излучения** (RF Leakage). В лучших моделях – -90 дБ;
- **число циклов замыкания и размыкания**, гарантированное. В лучших моделях – до 1000;
- **сопротивление изоляции.** В лучших моделях – порядка 10 ГОм;
- **сопротивление замкнутых внутреннего и наружного контактов.** В лучших моделях – не более 0,2 мОм;
- **проходящая мощность**, максимальная. В лучших моделях – до 1,2 кВт.
- **конструктивно-присоединительные параметры:** усилие соединения/разъединения, различные варианты сочетаний параметров.

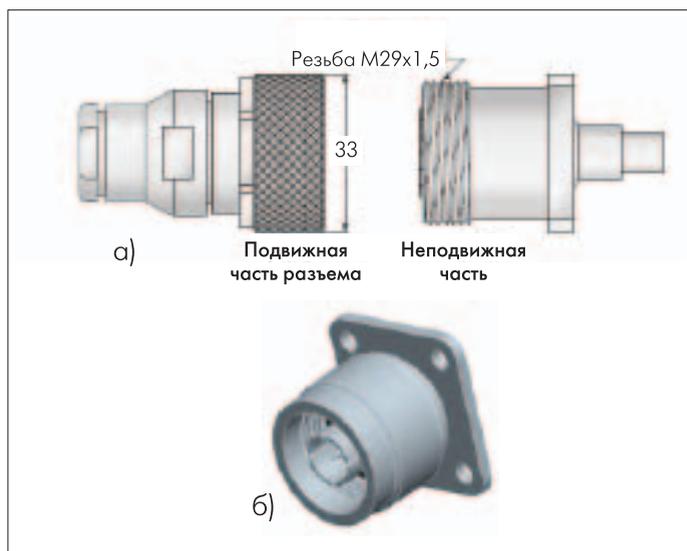


Рис. 1. Среднеразмерные разъемы типа 7/16 DIN (а) и N (б) (размеры в миллиметрах)

СОВРЕМЕННЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ РАДИОЧАСТОТНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ НА МИРОВОМ РЫНКЕ

Сегодня в мире действуют несколько специализированных фирм, выпускающих радиочастотные соединители. Среди них можно выделить [1–11]:

- **Coaxicom** [1]. Корпорация основана в 1985 году. Выпускает широкую номенклатуру радиочастотных кабелей, соединителей, адаптеров для согласования их типов;
- **Tensolit** [3]. Основана в 1941 году. Производит разнообразную кабельную и антенную технику для авиакосмической промышленности;
- **Radiall** [5]. Международная корпорация, основанная в 1952 году во Франции. Имеет 13 филиалов в странах Европы, Америки, Азии и Африки;
- **Pasternack** [8]. Производит широкую номенклатуру изделий для микроволнового и оптического диапазонов (кабельно-волноводные изделия, усилительные и умножительные узлы, ферритовые вентили, нагрузки и согласующие устройства);
- **Amphenol RF** [2]. Международная корпорация, выпускающая коаксиальные соединители более 50 лет. Продажи таких соединителей корпорации за 2005 год превысили

1,5 млрд. долл.;

- **Hubert+Suhner** [10]. Швейцарская группа, специализирующаяся на высококачественной электронной продукции радиочастотного и оптического диапазонов. Совместно с Radiall основала и развивает Альянс производителей стандартизированной радиочастотной продукции **QLF** (Quick Lock Formula);
- **TYCO**. Многопрофильная инновационная компания [11]. Выпускает конкурентоспособные кабельно-соединительные изделия для электронной аппаратуры. Наиболее широко на рынке представлены радиочастотные соединители следующих серий:
 - **7/16 DIN** (рис. 1а). Получила наименование по размерам диаметров внутреннего и внешнего проводников в миллиметрах. Соответствует европейскому стандарту Deutch Industries Norm (DIN). В серии использована метрическая резьба, допустимая по нормам США. Предназначена для цепей с повышенной проходящей мощностью;
 - **N** (см. рис. 1б). Названа по фамилии инженера отделения Bell Labs компании AT&T П.Нейлла (P. Neill), предложившего соединитель этого типа в 1940 году. Соединитель имеет средние размеры, устойчив к износу, выпускается в исполнении, защищенном от воздействия агрессивных сред. Обеспечивает соединение блоков, работающих на частотах до 11 ГГц;
 - **BNC**. Разработана в 1940 году инженером фирмы Amphenol Б. Консельманом (B. Concelman) как миниатюрная версия соединителя типа С и носит его имя. Широко применяется для разнообразных условий соединения электронных узлов с кабелями и платами. Обеспечивает работу в полосе частот до 4 ГГц. Отдельные фирмы выпускают 50-Ом соединители этого типа для сигналов на частотах до 11 ГГц;
 - **Mini-UHF** (рис. 2а). Выпущена в 1970 году как миниатюрный вариант соединителя UHF, который использовался в радиотехнической промышленности с 1930 года. Предназначена для присоединения разнообразных современных гибких коаксиальных кабелей типа RG-58 и для сопряжения с печатными платами;

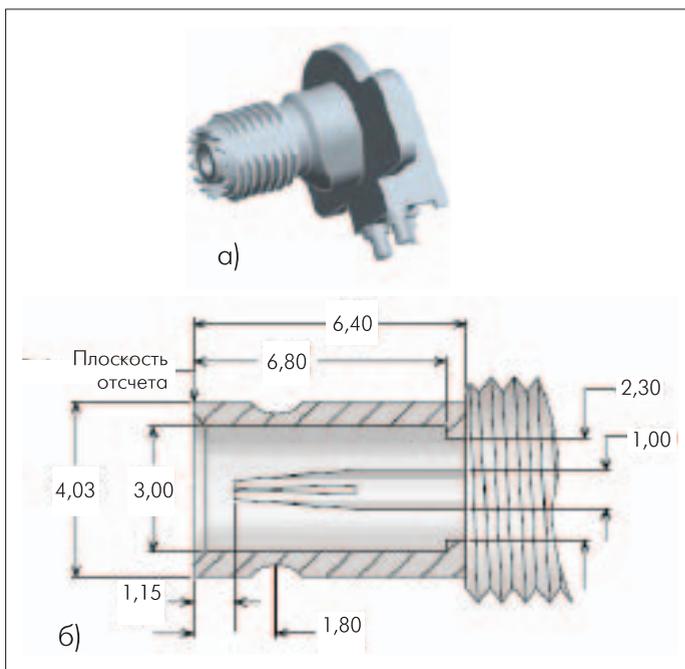


Рис.2. Миниатюрные разъемы Mini-UHF (а) и типа 1.0/2.3 (б)

- **1.0/2.3** (см. рис.2б). Разработана европейскими производителями в 1990 году для компактной аппаратуры авиационного и космического назначения, работающей на частотах до 10 ГГц. В соединителях серии применена тефлоновая изоляция;
- **SMP** (рис.3а). В серию входит набор субминиатюрных соединителей для частот в диапазоне от 18 до 40 ГГц;

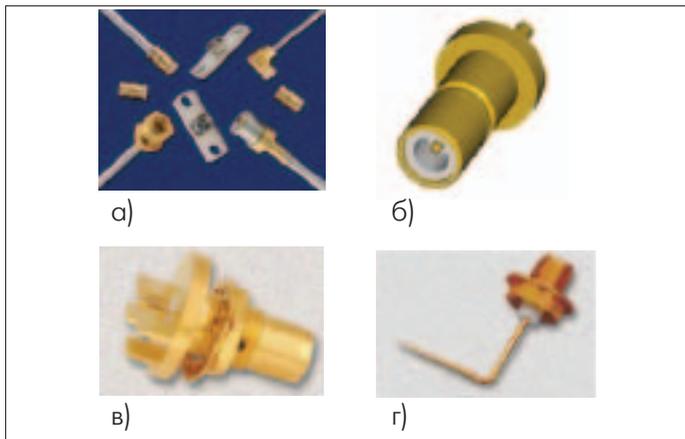


Рис.3. Субминиатюрные соединители SMP (а), SMB (б), BMA (в), SMA (г)

- **SMA** (SubMiniature version A). Субминиатюрный соединитель с повышенной износостойкостью. Создан в 60-е годы и предназначен для цепей с сигналами на частоту до 18 ГГц (см. рис.3в).
- **SSMB, SSMA, MMCX, 1,85mm, SMPM** – микроминиатюрные (рис.4) соединители для сигналов с предельно высокими частотами (до 40–65 ГГц). Особенность серии MMCX, разработанной в 1990 году, – механизм соединения ("lock-snap") с возможностью поворота на 360° вокруг оси соединителя.

Типичные частотные диапазоны основных типов соединителей представлены на рис.5.

Сочленения неподвижной и подвижной частей радиочастотных соединителей могут выполняться путем давления, свинчивания, защелкивания, смещения, байонетного замыкания, механической блокировки. При этом значения усилия соединения/разъединения и силы сдавливания в контактной зоне различны. Ряд конструктивных решений в этой области запатентован.

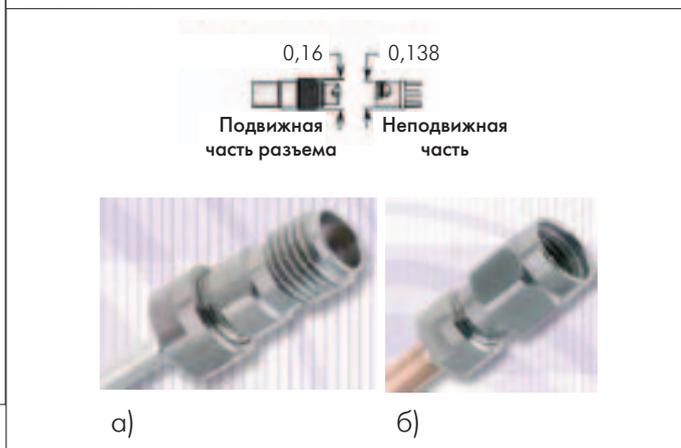


Рис.4. Микроминиатюрные разъемы MMCX компании Delta (а) и SSMA компании Radiall (б)

На неподвижной (Jack) части коаксиального соединителя стандартной конфигурации размещается гнездо (Female), а на подвижной (Plug) – вилка (Male). Европейскими и американскими стандартами разрешены выпускаемые в этих

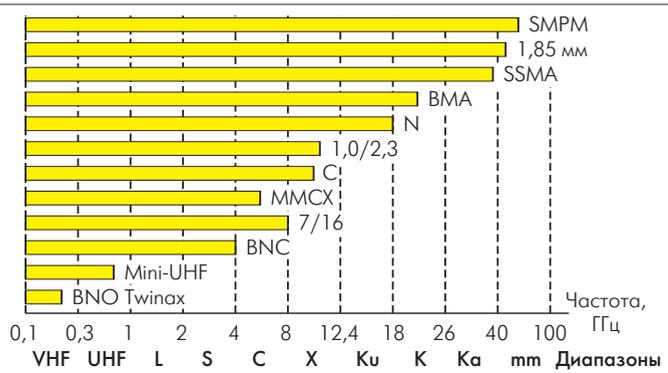


Рис.5. Частотный диапазон некоторых серий СВЧ-соединителей

регионах соединители обратной полярности (рис.6), а также смешанной (hermaphroditic) конструкции.

Конструкции соединителей отличаются типом кабеля (полужестким, гибким или сверхгибким); способом соединения с внешними высокочастотными цепями центрального и внеш-



Рис.6. Разъем серии TNC "обратной полярности"

Параметры радиочастотных коаксиальных соединителей

Серия	Диапазон частот, ГГц	Диаметр кабеля, мм	СВЧ-мощность, Вт (на 1 ГГц)	Число циклов	Диапазон температур, °С	Мощность излучения, дБ ¹⁾	Сопротивление		Источник информации
							изоляции, ГОм	контакта, МОм	
BNC Twinax ²⁾	0–1	3–10	–	500	-50...125	–	5	2	[4], [10]
Mini-UHF	0–2,6	3–5	1000	500	-55...85	–	5	–	[2]
BNC	0–4	3–8	800	100/500	-65...165	55	5	1,5	[1], [5]
BNC Triax ³⁾	0–4	5–11	800	500	-50...125	–	10	1	[4], [5]
MMCX	0–6	2–4	–	500	-55...155	–	1	5	[7], [10]
7/16 DIN	0–6	11	3000	500	-40...150	–	5	–	[1], [2], [5]
1.0/2.3	0–10	2,3	100	500	-40...155	–	10	–	[2], [4]
C	0–11	5–11	1200	500	-65...165	–	10	–	[5]
ZMA ⁴⁾	0–12,4	2–5	250	500	-55...155	-90	10	–	[7]
BMA	0–18	3–6	–	1000	-40...100	90	5	2	[1]
N	0–18	6	1200	500	-65...165	-90	5	0,2	[2], [5]
TNC	0–18	3–8	800	500	-65...165	-60	5	1,5	[1], [5]
3.5mm	0–33	2–4	–	100	-65...90	-70	5	3	[2], [10]
SMA	0–40	3–5	–	500	-55...125	–	5	3	[1], [4]
SSMA	0–40	2	100	500	-65...165	-100	5	2	[1], [2], [4]
SMP	0–40	2–3	–	500	-65...165	-80	5	6	[4], [9]
1.85mm	0–60	1–2	–	100	-65...165	–	1	–	[8]
SMPM	0–65	1	–	100/1000	-65...165	–	1	–	[4]

Примечание. ¹⁾ На частоте 3 ГГц; ²⁾ двухпроводный кабель 78–130 Ом; ³⁾ две коаксиальных оплетки; ⁴⁾ байонетное соединение в 1/4 или 1/3 поворота.

него проводников (пайкой или сдавливанием); способом закрепления неподвижной части (наружным или внутренним фланцем, двумя или четырьмя винтами, гайкой, запрессовыванием, пайкой); видом основы неподвижной части (металлическая панель блока, печатная плата); требованиями к влаго- и вибростойкости, к напряжению между центральным и наружным проводниками; требованиями к изменению направления линии передачи и др.

ведущие производители соединителей используют немагнитные сплавы, тщательно подбирают режим электрохимической обработки поверхностей и их покрытия. При выборе сопротивления в зонах контакта центрального и внешнего проводников, допустимого уровня СВЧ-мощности, а также гаран-

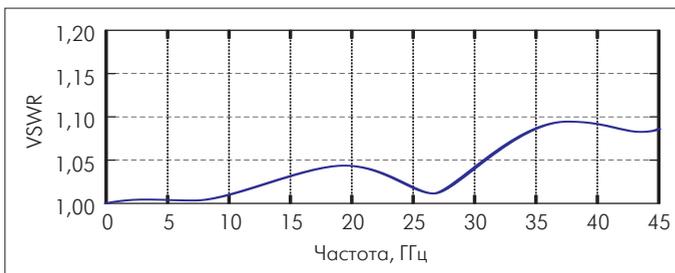


Рис. 7. Зависимость VSWR от частоты для разъема серии SMP компании SVMicro [7]

Ограничения на наибольшую проходящую мощность соединителей возникают из-за влияния нескольких факторов. Это, во-первых, вероятность появления короны на внутренних участках соединителя с повышенным градиентом изменения электрического поля. Чтобы снизить влияние этого эффекта оптимизируют форму диэлектрических вставок, вакуумируют и обеспечивают герметичность конструкции. Во-вторых, при повышенной высокочастотной мощности возрастает вероятность нелинейных искажений сигнала. Это связано с возникновением контактной зоны с нелинейными вольт-амперными характеристиками при механическом соединении металлических поверхностей. Наиболее заметны нелинейные свойства при контакте оксидных пленок на поверхности ферромагнитных материалов. Для минимизации этого эффекта

тированного числа циклов соединения и разъединения приходится находить компромисс между значениями высокочастотных и механических параметров соединителя.

Различаются радиочастотные соединители и по относительному уровню паразитного СВЧ-излучения контактной зоны. Для недорогих моделей этот параметр составляет -40 дБ. Для моделей, оптимизированных по уровню паразитного излучения, например для серии SMA корпорации Coaxicom, гарантированный уровень такого рода излучений не превышает $-100 + f$, где рабочая частота f выражена в гигагерцах, а уровень ослабления в децибелах. С увеличением рабочей частоты возрастает гарантированный уровень VSWR радиочастотных соединителей. Например, для серии SMA компании Radiall в полосе частот до 40 ГГц гарантированный уровень VSWR не хуже $1,05 + 0,005f$. Фактические значения VSWR меньше значений, полученных по подобным формулам (рис.7).

Параметры соединителей основных производителей представлены в таблице. Следует обратить внимание на ограничение гарантированного числа циклов соединений/разъединений устройств с электромеханическими контактами. Интервал рабочих температур заметно превышает возможности активных полупроводниковых устройств. Некоторые производители не приводят детальных технических характеристик, ссылаясь на стандартизированные нормы для конкретных применений. Каждый из них, наряду с выпуском соединителей типовых серий, предлагает также собственные, обычно запатентованные, конструкции.

АДАПТЕРЫ

На рынке представлено множество различных вариантов соединителей, производимых даже одной компанией. Поэтому неудивительно, что каждая из них выпускает большое число адаптеров, обеспечивающих переход с одной серии на другую (рис.8). Поскольку в аппаратуре используются несколько се-

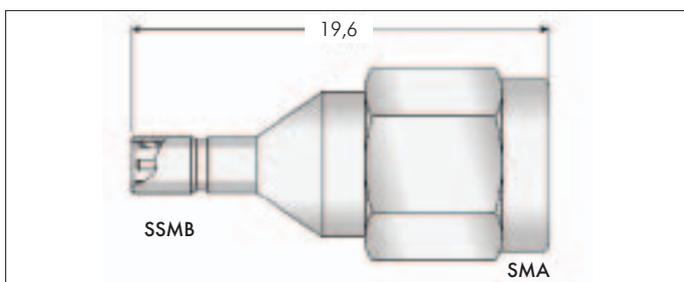


Рис.8. Согласование разъемов серий SSMB и SMA с помощью адаптера компании Coaxicom

рий соединителей, при проведении экспериментальных работ требуется касса разнообразных адаптеров. Применение цепочек из нескольких последовательно включенных адаптеров существенно снижает полосу и ухудшает другие высокочастотные свойства цепи. Наряду с собственно адаптерами ряд производителей (например, корпорация Coaxicom) выпускают такие сопутствующие коаксиальные изделия, как адаптоаттенюа-

торы, добавители фазы (Phase Adjuster, Phase Trimmer) [8], разделители по постоянному току (DC Block), согласованные нагрузки, короткозамыкающие (Short) или разомкнутые (Dust Caps) антипыльные крышки и др. Весьма полезными могут оказаться наборы оснастки для зарядки микроминиатюрных соединителей, без которых трудно обеспечить нужное качество соединения и реализовать гарантированные параметры.

Особая задача – обеспечение сопряжения изделий разных производителей. Ее решению в значительной степени способствует регулирующая деятельность Альянса QLF и стандартизация соединителей. Члены Альянса [1–10] сопровождают свои изделия перекрестными ссылками на серийные номера сопрягаемых изделий других производителей.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ

Помимо соединителей массового применения для стандартных систем выпускаются специализированные изделия. Можно выделить следующие их типы:

- для экранированных двухпроводных линий (Twin);
- с двумя экранирующими электродами (Triax) и пониженным уровнем паразитного излучения;
- межблочные, два сочленяемых узла которых закрепляются на корпусах блоков. Конструкция такого соединителя предусматривает патентованные меры коррекции несоосности. Пример – соединитель серии AFI с полосой частот до 6 ГГц фирмы Amphenol;
- допускающие вращение вокруг центрального проводника на 360° (серия MMCX);
- со встроенным четвертьволновым шлейфом (серия Quarter Wave Stub, QWC), позволяющие улучшать согласование при известной частоте сигнала, а также подключать постоянное напряжение смещения;
- с поворотом линии передачи на 90° или с определенным радиусом изгиба;
- с "прыгающим" механизмом соединения, отличающиеся малым усилием соединения/разъединения;
- конструкция, позволяющая одновременно соединять (разъединять) несколько типов кабелей: коаксиальных (с частотой сигнала до 40 ГГц), волоконно-оптических или кабелей электропитания. Многие крупные производители [2, 3, 5, 11] выпускают подобного рода комбинированные соединители, рассчитанные на 5–12 линий (рис.9).



Рис.9. Многокабельный соединитель компании Tensolit



Основные тенденции развития радиочастотных коаксиальных соединителей: расширение полосы пропускаемых частот вплоть до миллиметрового диапазона без резонансных явлений; повышение механической точности изготовления соединителей и кабельных отрезков, что обеспечивает снижение потерь, уменьшение VSWR, повышенную долговечность, а также взаимозаменяемость изделий; существенное увеличение числа конструктивных вариантов. Кабельно-соединительная продукция, пригодная для работы в сверхширокой полосе частот (от постоянного тока до десятков гигагерц), требует высокого качества изготовления, калибровки параметров, соединения с линией передачи и потому стоит дорого.

Дополнительные сведения о конструкции и параметрах СВЧ коаксиальных соединителей отечественных и зарубежных производителей имеются в [12].

Чтобы предотвратить случайный или неоптимальный выбор соединителя из-за огромного разнообразия конструкций и свойств, следует воспользоваться консультацией квалифицированных специалистов. Фирма РАДИОКОМП [13], как официальный представитель корпорации Coaxicom – одного из ведущих мировых разработчиков коаксиальных соединителей, предоставляет такие услуги, а также оказывает помощь в приобретении и таможенной очистке изделий зарубежного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.coaxicom.com
2. www.amphenolrf.com
3. www.tensolite.com
4. www.deltarf.com
5. www.radiall.com
6. ebiz.midwest-microwave.com
7. www.svmicrowave.com
8. www.pasternack.com
9. www.aepconnectors.com
10. www.hubersuhnerinc.com
11. www.tycoelectronics.com
12. **Джуринский К.Б.** Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
13. www.radiocomp.ru