КИВА ДЖУРИНСКИЙ, к.т.н., kbd.istok@mail.ru

РАДИОЧАСТОТНЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ PSM И TNC VHP КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены соединители PSM компании Huber+Suhner с пороговой импульсной мощностью 1600 Вт на частотах 435 МГц и 1,155 ГГц, превосходящей на 50% мощность соединителей TNC, но с меньшей на 60% массой по сравнению с ними. Соединители PSM оптимизированы с учетом требований теплового, высокочастотного ионизационного, коронного и мультипакторного пробоев и пассивной интермодуляции. Приведены основные параметры соединителей TNC VHP компании Radiall с допустимой пропускаемой мощностью 400 Вт на частоте 2 ГГц и с пороговой импульсной мощностью 2000 Вт, не приводящей к возникновению мультипакторного пробоя.

НАЗНАЧЕНИЕ СОЕДИНИТЕЛЕЙ PSM

Космическая индустрия является процветающей отраслью с большими возможностями. По оценкам некоммерческого космического фонда, космическая экономика во всем мире в 2014 г. составляла 330 млрд долл., при этом в 2005–2014 гг. ежегодный темп роста был не менее 7% [1].

Важнейшей частью космической индустрии является спутниковая связь, основная тенденция развития которой — создание высокоскоростных систем большой пропускной способности и миниатюризация (уменьшение веса и размеров) для сокращения затрат на запуск спутника. Для увеличения пропускной способности и скорости передачи данных используются все более высокие частоты, соответствующие соединители и кабели.

Стандартные соединители SMA, отличающиеся высокой механической прочностью, длительным сроком службы, надежностью и низким КСВН, нашли широкое применение во всем мире [2]. Однако использование этих соединителей в устройствах космического назначения (например, в мощных передатчиках телекоммуникационных спутников для систем GPS, GSM) ограничено невысокой допустимой мощностью непрерывно пропускаемого СВЧ-сигнала [3–7]. Это связано с тем, что конструкция соединителя SMA не оптимизирована с целью предотвращения высокочастотного, коронного, мультипакторного разрядов и перегрева. В результате в устройствах космического назначения при непрерывной мощности выше 10 Вт приходится использовать соединители TNC с большей допустимой мощностью, но с относительно большими габаритными размерами и массой, хотя для сокращения затрат на запуск спутника необходимо максимально уменьшать массу и размеры всех входящих в него элементов.

В связи с этим Европейское космическое агентство (ESA) в рамках программы ARTES (Advanced Research in Telecommunications Systems) финансировало работы по исследованию, проектированию, изготовлению опытных образцов и проверке электрических параметров соединителей, сочетающих небольшие размеры и массу (как у соединителей SMA) с высокой непрерывной мощностью (как у соединителей TNC) [5–6].

Разрабатываемый соединитель должен удовлетворять следующим требованиям.

1. Возможность применения при пониженном давлении (менее 100 кПа).
2. Его размеры и масса, а также диапазон рабочих частот должны быть приблизительно такими же, как у соединителя SMA.
3. Электрические параметры соединителя должны быть на уровне параметров соединителя TNC и соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.

Европейский консорциум, в который вошли швейцарские компании Huber+Suhner и Lema/Epfl, немецкая компания TU Darmstadt и ESTEC/ESA (Нидерланды), в течение двух лет вел работу над созданием соединителя. Непосредственно разработ-

Таблица 1. **Требования к электрическим параметрам разрабатываемого соединителя**

Требования	Частота, ГГц	Допустимая мощность, Вт		Время
		Рабочая	Испытательная	
Коронный разряд	1	40	80	10 мин
	4	30	60	
	11,6	30	60	
Непрерывная мощность	1	50	100	10 мин
	4			
	11,6			
Импульсная мощность, мультипакторный пробой	1	200	800	1 мс
	4	180	720	
	11,6	150	600	
Уровень интермодуляции менее –140 дБм	1,65	50	–	–

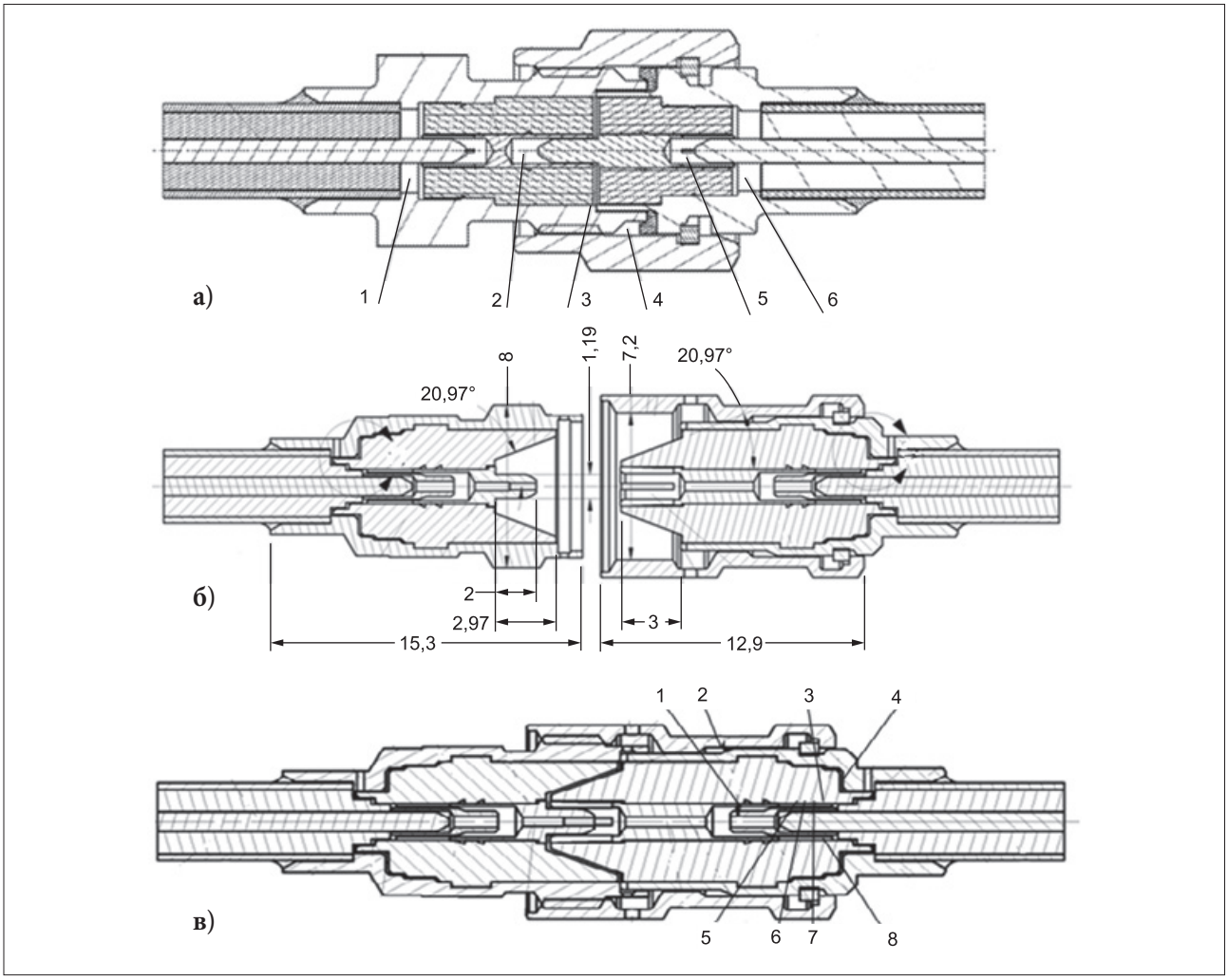

Рис. 1. Соединитель SMA вилка и розетка в сочлененном состоянии (а), соединитель PSM вилка и розетка до сочленения (б), в сочлененном состоянии (в). Выносными линиями с номерами обозначены области соединителя, в которых имеются воздушные зазоры

ку соединителя осуществляла компания Huber+Suhner. Он был создан на основе соединителя SMA (его другое название — SMA повышенной мощности) и оптимизирован с учетом требований высокочастотного пробоя, коронного разряда, мультипакторного эффекта и многофакторной пассивной интермодуляции. Презентация разработанного соединителя, получившего название PSM (Power Sub-Miniature), состоялась в сентябре 2013 г. Приоритет компании Huber+Suhner в мае 2010 г. был закреплен патентами US20130143430A1 и WO 2011141353A1 [8–9].

КОНСТРУКЦИЯ СОЕДИНИТЕЛЯ PSM

Конструкции соединителя PSM (вилки и розетки) и, для сравнения, соединителя SMA показаны на рис. 1 [8, 9], а их внешний вид — на рис. 2 [7, 10]. Коаксиальная линия соединителей PSM с изолятором из PTFE (тефлона, фторопласта) имеет размеры 5,5/1,7 мм (для сравнения: размеры коаксиальной линии соединителя SMA — 4,1/1,27 мм, соединителя TNC — 6,5/2,06 мм). Изоляторы имеют ступенчатую конструкцию с конусообразной (угол конуса 21°) выходной частью. Соединение внутренних проводников — стандартное цанговое. При сочленении розетки и вилки конусы изоляторов входят друг в друга практически без зазора.

Накидная гайка кабельного разъема вилка изготовлена из бериллиевой бронзы и покрыта специальным составом для достижения более высокой излучательной способности (для лучшего отвода тепла в вакууме). Накидные гайки кабельных соединителей PSM и SMA завинчиваются одним и тем же тарированным ключом размером 8 мм с моментом затяжки 100 Н•см. Размеры фланцев фланцевых соединителей обоих типов одинаковы. Однако, несмотря на близ-

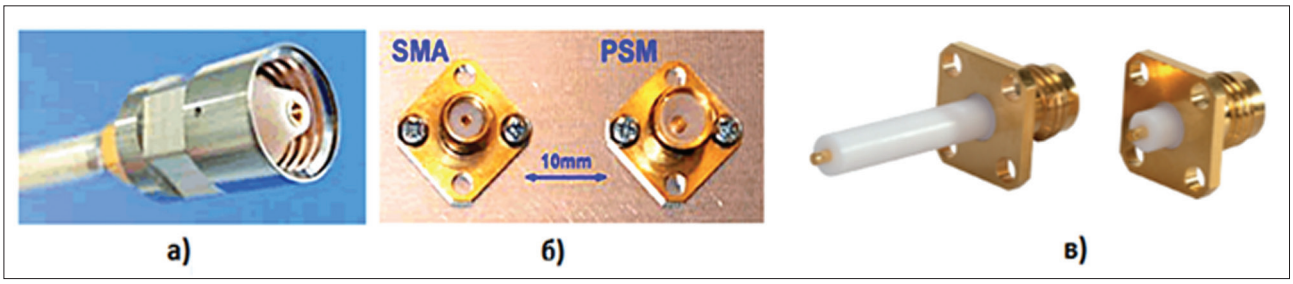

Рис. 2. Кабельная вилка PSM (а), фланцевые соединители SMA и PSM (б), выводы энергии PSM (в)

Рис. 3. Кабельные сборки с соединителями TNC и PSM

кие внешние размеры соединителей PSM и SMA, их можно соединять друг с другом только с помощью адаптеров PSM–SMA вилка–розетка.

Кабельные соединители PSM выгодно отличаются от соединителей TNC своими размерами и массой (меньше приблизительно на 60%) — рис. 3.

ЗАДАЧИ, РЕШЕННЫЕ ПРИ СОЗДАНИИ СОЕДИНИТЕЛЕЙ PSM

При создании соединителя PSM было решено несколько следующих задач.

1. Повышение допустимой пропускаемой мощности в диапазоне частот 0–18 ГГц

Допустимая пропускаемая мощность (P) ограничена явлениями электрического и теплового пробоя и зависит от размеров коаксиальной линии соединителя [2]:

$$P \approx E_{max}\, d^2 \ln (D/d), \quad (1)$$

где E_{max} — максимальная напряженность электромагнитного поля; d и D — диаметры внутреннего и наружного проводников коаксиальной линии соединителя.

Чтобы увеличить пропускаемую мощность, следует увеличить размеры коаксиальной линии в соответствии с формулой (1), обеспечив при этом необходимое волновое сопротивление 50 Ом и предельную частоту, не меньшую, чем у соединителя SMA.

Теоретическая предельная частота, при которой в коаксиальной линии радиочастотного соединителя с диаметрами D, d и диэлектрической проницаемостью изолятора ε еще не возникают нежелательные волны высших типов, приблизительно равна [2]:

$$f_{пред.}\,(\text{ГГц}) \approx 190{,}8/\sqrt{\varepsilon}\,(D + d). \quad (2)$$

В соединителе PSM для увеличения допустимой пропускаемой мощности по сравнению с соединителем SMA размеры коаксиальной линии были увеличены с 4,1/1,27 мм до 5,5/1,7 мм. Теоретическая предельная частота соединителя PSM, рассчитанная по формуле 2, равна 18,3 ГГц. Верхняя рабочая частота применения соединителя SMA также равна 18 ГГц.

2. Предотвращение теплового пробоя

Соединитель PSM целесообразно рассматривать в составе кабельной сборки. Во время космического полета несколько факторов могут ограничить пропускаемую мощность сборки. Наиболее общим ограничивающим фактором является тепловой пробой вследствие чрезмерного нагрева соединителя и кабеля выделяемой тепловой энергией [6]. Отвод тепла в кабельной сборке происходит тремя основными способами. Около 50% тепла рассеивается вдоль центрального проводника, теплопроводность которого приблизительно в 1000 раз больше, чем у окружающего его изолятора из фторопласта. Кроме того, тепло, образующееся внутри центрального проводника, отводится через изоляцию кабеля и соединителя. Наконец, тепло может отводиться излучением, но это самый неэффективный способ. Наибольшую способность снижать температуру сборки обеспечивают первые два способа.

По данным американской компании W. L. Gore Associates, с возможностью теплового пробоя в соединителях при нормальном давлении, рабочей температуре ниже 70 °С и частоте более 3,6 ГГц необходимо считаться, когда $Pf > 60$ (для соединителя TNC) и $Pf > 40$ (для соединителя SMA), где P — СВЧ-мощность, Вт; f — частота, ГГц [11].

3. Предотвращение мультипакторного и высокочастотного ионизационного и коронного пробоев

Уменьшение размеров коаксиальной линии приводит к возрастанию напряженности электромагнитного поля в соединителе. Мультипакторный и высокочастотный ионизационный (переходящий в коронный) разряды возникают в радиочастотных соединителях повышенной мощности. Пробои обоих типов в соединителях с диэлектрическим заполнением происходят под воздействием периодического СВЧ-поля в замкнутых воздушных промежутках (зазорах) между проводниками коаксиальной линии соединителей. Кроме того, неблагоприятное расположение зазоров оказывает негативное влияние на теплообмен в соединителе.

Мультипакторный (Multipaction Breakdown) вторично-эмиссионный микроволновый разряд возникает в вакууме в результате электронной лавины, вызванной вторичной электронной эмиссией с поверхности проводников соединителя, которые бомбардируются электронами, ускоренными в СВЧ-поле. В результате в поверхностном слое диэлектрика на границе с проводниками соединителя возникают большие градиенты температуры, приводящие к его разрушению. Этот эффект возникает в высоком вакууме, когда длина свободного пробега электрона больше расстояния между внутренним и наружным проводниками.

При давлении ниже 10^{-5} мм рт.ст. (соответствующем значению на высоте свыше 150 км [12]) мультипакторный пробой ограничивает допустимую пропускаемую мощность соединителя. При более высоких давлениях мультипакторный эффект существовать не может.

По данным американской компании W. L. Gore Associates [12] в соединителе SMA:

- при соотношении $f \cdot \delta < 0{,}7$ ГГц•мм доминирует мультипакторный разряд;
- при $f \cdot \delta > 2$ ГГц•мм — высокочастотный разряд;
- при $2 < f \cdot \delta < 0{,}7$ ГГц•мм возможны оба вида разряда, где f — частота, ГГц; δ — зазор между проводниками, мм.

Высокочастотный ионизационный разряд происходит при давлении воздуха, равном нескольким миллиметрам ртутного столба, при уровне проходящей мощности, зависящем от конструкции коаксиальной линии соединителя. Ионизация происходит, когда концентрация электронов возрастает в результате столкновений свободных электронов с молекулами воздуха. Электрон, возникший при случайной ионизации нейтральной молекулы, ускоряется в электрическом поле и приобретает энергию, достаточную для того, чтобы при столкновении со следующей молекулой ионизовать ее.

Коронный разряд — самостоятельный газовый разряд, возникающий в резко неоднородных полях в местах с острыми краями, где напряженность поля максимальна. При воздействии высокочастотного поля высокой мощности изначально низкая плотность электронов лавинообразно возрастает до состояния плазмы. Возникает свечение голубого цвета в виде короны из-за ионизации молекул кислорода, содержащегося в воздухе, и образования озона. Коронный разряд может возникать при сравнительно высоком давлении воздуха, соответствующем высоте 10–50 км, и маловероятен в вакууме [12].

Соединитель SMA оказался непригоден для космического применения, так как внутри его имеется ряд закрытых сравнительно больших радиально ориентированных полостей и зазоров, расположение которых таково, что никакая значительная вентиляция невозможна —

рис. 1а. Наличие воздушных зазоров несущественно при эксплуатации соединителей SMA в наземном оборудовании, но недопустимо при их использовании в условиях космоса.

В разработанном соединителе PSM предусмотрены конструктивные меры по предотвращению мультипакторного и коронного пробоев. Зазоры во внутренней части соединителей PSM настолько малы, что, в сущности, соединитель имеет «бесщелевую» конструкцию — рис. 1в. Применяемые материалы имеют низкие коэффициенты вторичной электронной эмиссии. Для предотвращения коронного разряда в соединителе PSM, работающем в условиях космоса, предусмотрены дополнительные внутренние каналы, соединенные с вентиляционными отверстиями на наружной поверхности соединителя. Упомянутые выше патенты US20130143430A1 и WO2011141353A1 компании Huber+Suhner описывают конструкции вентиляционных каналов в соединителе PSM. Одно такое вентиляционное отверстие показано на накидной гайке соединителя вилка — рис. 2а. Кроме того, для предотвращения коронного разряда в соединителях PSM максимально устранены замкнутые внутренние зазоры и острые кромки.

Пробои всех видов необходимо учитывать и во время наземных испытаний изделий на повышенную мощность, а также во время запуска в космос.

4. Снижение уровня пассивной интермодуляции

Развитие систем спутниковой связи, использующих цифровые схемы модуляции с возросшей емкостью каналов, высокой мощностью передачи и высокой чувствительностью приемников, потребовало снижения уровня пассивной интермодуляции (Passive Intermodulation, PIM). Уровень интермодуляционных сигналов, попадающих в полосу передачи,— критический параметр, который влияет на характеристики систем связи и эффективность коммуникации [2, 6, 13].

По сути, интермодуляция — нелинейный отклик двух или более сигналов разных частот, смешанных друг с другом в нелинейном устройстве. Когда достаточно мощный входной сигнал поступает в такое устройство, то наряду с несущей частотой f_1 возникают гармоники $2f_1$, $3f_1$… nf_1. Если же входной сигнал содержит два или более гармонических сигнала с частотами f_1, f_2… f_n, то выходной сигнал нелинейного устройства состоит уже из спектра частот. В результате взаимодействия этих сигналов и их гармоник в нелинейном устройстве на его выходе возникают интермодуляционные составляющие — IMP (Inter Modulation Products) вида $mf_1 \pm nf_2$ в зависимости от мощностей основных сигналов и, особенно, от степени нелинейности устройства — рис. 4 [14].

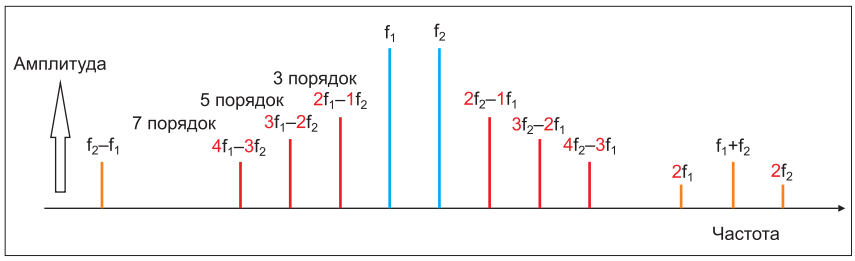

Рис. 4. Спектр интермодуляционных частот

Наибольшие неприятности причиняют интермодуляции нечетных порядков, поскольку они располагаются ближе всего к несущим частотам. Интермодуляции 3-, 5-и 7-го порядков составляют более 95% всех интермодуляционных помех нелинейного пассивного устройства.

Одним из таких нелинейных устройств являются радиочастотные соединители, которые делятся в соответствии с двумя основными категориями нелинейности: нелинейности контакта в соединении «металл–металл» и нелинейности материалов и покрытий поверхности соединителей. Они возникают из-за:

– слабого усилия и неполного контактирования (неудовлетворительное состояние поверхности: неровности, микротрещины, дефекты и загрязнения);
– поверхностных пленок окислов, сульфидов;
– применения материалов с магнитными свойствами.

Поэтому все металлические детали соединителей PSM изготовлены из немагнитной бериллиевой бронзы. Исключено применение нержавеющей стали, имеющей слабые магнитные свойства.

Необходимо, чтобы уровень интермодуляционных искажений в соединителях был минимальным [2, 6, 7]. Измерение интермодуляций осуществляется путем ввода в тестируемое устройство двух сигналов одинаковой мощности, но разной частоты.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЕДИНИТЕЛЕЙ PSM

Основные технические характеристики соединителей PSM, SMA и TNC VHP приведены в табл. 2 [7, 15].

Измерения параметров соединителей PSM проводились в лабораториях ESA-VSC, VAL Space, Валенсия. На рис. 5 показаны пороговые уровни импульсной мощности, при которых еще отсутствует мультипакторный пробой, соединителей SMA, PSM и TNC [6]. Пороговые значения мощности на частоте 1,155 ГГц, не приводящие к возникновению мультипакторного пробоя, равны для соединителей: SMA — 10 Вт, TNC — 1000 Вт, PSM — 1500 Вт. Пороговые значения мощности соединителей PSM и SMA различаются в 15 раз, соединителей PSM и TNC — в 1,5 раза. Соединители PSM выдерживают также 90 Вт входной непрерывной мощности на частоте 1 ГГц без признаков пробоев [6–7].

Номинальная непрерывная пропускаемая мощность, не приводящая к тепловому пробою, соединителей PSM, SMA и TNC при температуре 65 °C и окружающем давлении менее 10^{-5} мм рт.ст. определялась в составе кабельных сборок. Результаты измерений приведены на рис. 6 [6].

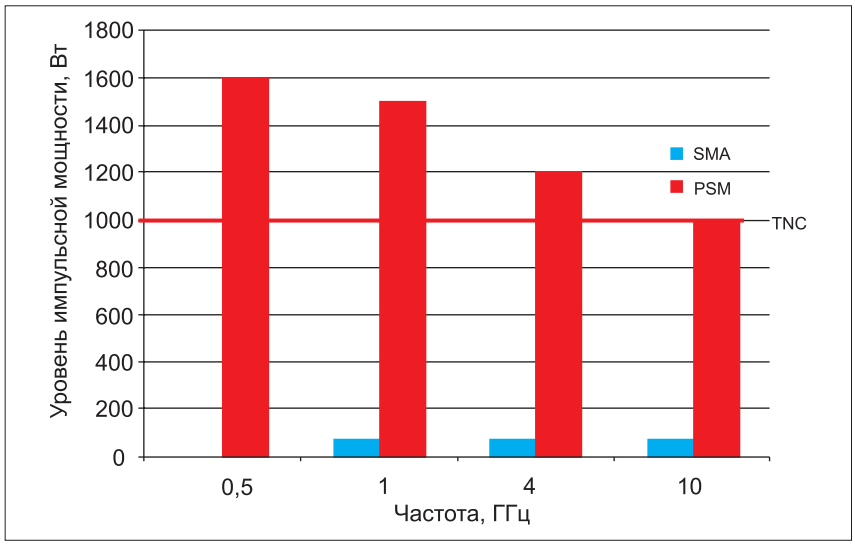

Рис. 5. Пороговые уровни импульсной мощности соединителей SMA, PSM и TNC в зависимости от частоты, при которых не происходит мультипакторный пробой

Таблица 2. **Технические характеристики соединителей PSM, SMA и TNC VHP**

Параметры соединителей	PSM	SMA	TNC VHP
Электрические параметры			
Волновое сопротивление, Ом	50	50	50
Диапазон рабочих частот, ГГц	0–18	0–18	0–8
Типичная величина КСВН (на частотах, ГГц)	1,07 (0–2); 1,12 (2–10); 1,20 (10–15)	1,05 (0–2); 1,07 (2–10); 1,15 (15–18)	1,25 (0–11)
Величина потерь в диапазоне частот 0–18 ГГц, дБ, менее (типичная величина потерь, дБ, в диапазоне частот 0–10 ГГц)	0,10 (0,05)	0,10	0,25
Экранное затухание, дБ, на частоте 2–3 ГГц	–90	–90	–60
Рабочее напряжение, В	335–500	335–500	500
Напряжение пробоя, В (зависит от типа кабеля)	750–1000	750–1000	1500
Предельная непрерывная мощность, Вт, при которой не возникает коронный разряд (на частоте, ГГц)	более 90 (1); 60 (4); 60 (11,6)	менее 50	120 (1); 100 (4)
Допустимая пропускаемая мощность, Вт (на частоте, ГГц)	более 100 (1; 4; 11,6)	менее 120	400 (2); 300 (4)
Пороговый уровень импульсной мощности, Вт, не приводящей к возникновению мультипакторного пробоя (на частоте, ГГц)	1600 (0,5); 1500 (1); 1200 (4); 1000 (10)	10 (1; 10)	2000 (1; 4; 10)
Уровень PIM, дБм: L — диапазон частот, гармоники 3-го порядка, мощность сигналов 2×50 Вт	< –140	–	–140
Сопротивление изоляции, МОм, более	10	5000	5000
Сопротивление контактов, мОм, проводников: центрального/наружного	2/2	3/2,5	1,5/1
Диапазон рабочих температур, °С	–65…160	–65…165	–65…165
Механические свойства			
Количество циклов сочленения и расчленения вилки и розетки, более	100	500	500
Рекомендуемый момент завинчивания накидной гайки вилки, Н•см	100	80–110	46–69
Усилие удержания центрального проводника, Н	27	27	47
Масса, г (фланцевый соединитель)	4	2,6	10
Материалы			
Корпус соединителя, центральные проводники, накидная гайка	Бериллиевая бронза	Корпус – нержавеющая сталь; штыревой контакт – латунь; гнездовой контакт – бериллиевая бронза	Корпус, штыревой контакт – латунь; гнездовой контакт – бериллиевая бронза
Покрытие	Золото	Золото	Золото
Изолятор	PTFE	PTFE	PTFE

Эти данные показывают, что пороговая мощность кабельной сборки с соединителями PSM ограничена не мультипакторным или коронным, а тепловым пробоем. При этом пороговая мощность такой сборки превосходит пороговые мощности сборок с соединителями SMA и TNC.

ТИПЫ РАЗРАБОТАННЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ PSM

Компания Huber+Suhner разработала 4 типа прямых кабельных соединителей PSM для паяного соединения с гибкими кабелями Sucoflex 106, Sucoflex 304 и полужесткими кабелями EZ 141 и EZ 250, 2 панельных фланцевых вывода энергии. Кроме того, разработаны 4 адаптера: 1 одноканальный PSM розетка – PSM розетка, 3 межканальных: PSM – TNC (розетка – розетка, вилка – розетка и розетка – вилка) с КСВН менее 1,1 в диапазоне частот 0–18 ГГц – рис. 7 [7, 15].

В настоящее время компания продолжает работу по модернизации соединителей PSM. Результаты этой работы, возможно, станут доступными в ближайшее время.

СОЕДИНИТЕЛИ TNC VHP

Одновременно с созданием соединителей PSM проводились работы и по совершенствованию соединителей TNC. Компания Radiall создала соединители TNC повышенной мощности TNC VHP (Very High Power) [16–17]. Технические характеристики соединителя TNC VHP приведены в табл. 2. Компания Radiall гарантирует параметры этих соединителей только в диапазоне частот 0–8 ГГц, в то время как предельная рабочая частота стандартных соединителей TNC равна 11 ГГц. Отметим также,

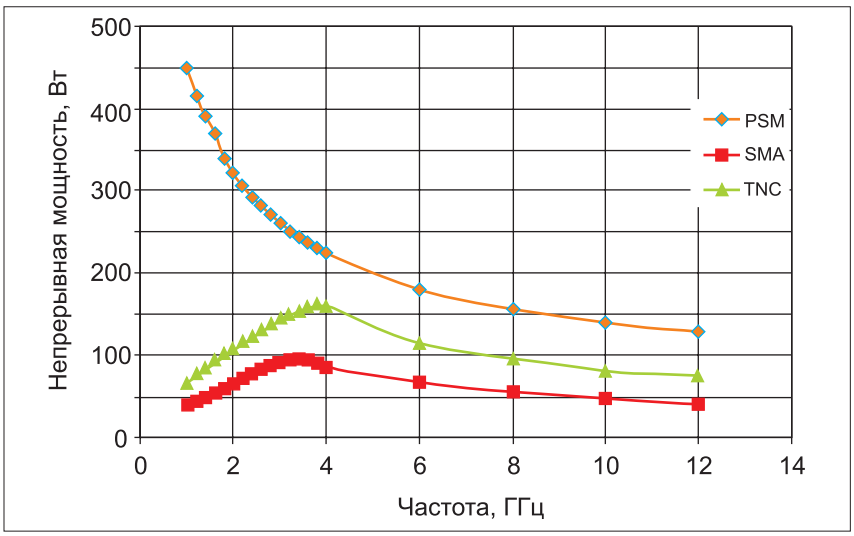

Рис. 6. Пороговые значения непрерывной мощности кабельных сборок с соединителями PSM, SMA и TNC

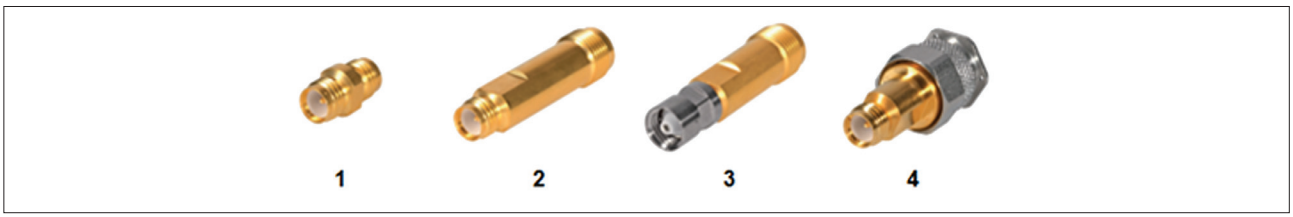

Рис. 7. Адаптеры PSM: PSM розетка – PSM розетка (1); PSM розетка – TNC розетка (2); PSM вилка – TNC розетка (3); PSM розетка – TNC вилка (4)

что допустимая пропускаемая мощность кабельных соединителей для полужесткого и гибкого кабелей при температуре 100 °С на частоте 2 ГГц — 400 Вт (полужесткий кабель) и 250 Вт (гибкий кабель), на частоте 4 ГГц — 300 Вт (полужесткий кабель) и 150 Вт (гибкий кабель). Пороговый уровень импульсной мощности, не приводящей к мультипакторному пробою при температурах –65…100 °С превышает 2000 Вт.

Для улучшения характеристик была оптимизирована конструкция стандартных соединителей TNC — вместо фторопласта был применен материал Fluoroloy [18] с более чем в 5 раз высокой теплопроводностью (соответственно 1,21 и 0,24 Вт/м•°С), устранены магнитные материалы, содержащие никель.

Компания Radiall разработала 15 типов соединителей TNC VHP:

- 4 типа кабельных соединителей для гибких кабельных сборок (кабель марки SHF8MS);
- 2 типа соединителей для полужесткого кабеля;
- 2 фланцевых вывода энергии;
- 7 внутрисерийных и межсерийных адаптеров, в том числе один герметичный адаптер, необходимый для установки в термовакуумную камеру, в которую подается мощность при тестировании соединителей.

Соединители TNC VHP совместимы со стандартными соединителями TNC. В настоящее время ведется работа по включению соединителей TNC VHP в стандарт ESCC (European Space Components Coordination).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка соединителей типа PSM способствует реализации все более сложных систем спутниковой связи, повышению уровня устойчивости канала радиосвязи, а также снижению массогабаритных характеристик бортового радиооборудования космических аппаратов. В сотрудничестве с Европейским космическим агентством (ESA) компании Huber+Suhner и Radiall создали соединители PSM и TNC VHP, соответственно, которые найдут применение в перспективном бортовом оборудовании спутников связи.

Автор благодарит В. Плескова за полезные замечания при обсуждении этой статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Special Connectors for a $330B Space Economy. Connector Supplier. www.connectorsupplier.com.

2. К. Джуринский. Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры. Под ред. д. т.н. А. Борисова. Медиа Группа Файнстрит, Санкт-Петербург, 2014.

3. High Power SMA Connectors. www.researchgate.net/publication/49457036.

4. PSM connector small but mighty/ESA's ARTES Programmes. https://artes.esa.int/news/psm-connector-small-mighty. 2011.

5. Project "High Power SMA Connectors" (ESTEC/Contract No. C20967/07/NL/GLC) ARTES-5 activity. K. Wettstein. High power SMA connectors (PSM Connectors).

6. Power Sub-Miniature PSM Connectors for Space Applications. H. Karstensen, J. Fuchs, K. Wettstein, D. Raboso, E. Sorolla, M. Mattes, D. Schönherr, HL Hartnagel. Space Passive Component Days, 1st International Symposium, 24–26 September, 2013. ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands.

7. Power Sub-Miniature PSM. https://www.repic.co.jp/pdf/Space PSM Connectors.

8. Patent US20130143430. Coaxial radiofrequency connector. www.google.com/patents.

9. Patent CA2798696C. Coaxial radiofrequency connector. www.google.com/patents.

10. PSM connector small but mighty. ESA's ARTES Programmes. https://artes.esa.int/news/psm-connector-small-mighty. Microwave Journal. October 2010.

11. W. L. Gore. High Power Operation of Coaxial Assemblies, Spaceflight Applications. www.gore.com.

12. Gore Spaceflight Microwave Cable Assemblies. www.gore.com.

13. Л. Белов, В. Кочемасов, Е. Строганова. Пассивная интермодуляция в СВЧ-цепях: механизмы появления, методы измерения и способы снижения. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2015.

14. PIM (пассивная интермодуляция) — важная характеристика. www.exclusive-comfort.ru/forum.

15. Space light weight and high reliability. www.repic.co.jp/pdf/catalog/Space Brochure en.pdf. 2013.

16. RF coaxial connectors TNC, very high power, 50 Ohms. https://artes.esa.int. 2017.

17. 14 RF Coaxial Connectors, TNC, Very High Power, 50 Ohms. ESCC Detail Specification № 3402/027.

18. А. Прокимов, К. Джуринский, Ю. Смирнова. Перспективные изоляционные материалы для радиочастотных кабелей и соединителей. Компоненты и технологии, 2017, № 2.