

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ-ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЗАПРОСНОГО СИГНАЛА В АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВАХ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.С. Лавриненков  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Рассматривается причина возникновения интерференции запросного сигнала в антенно-фидерных устройствах малых космических аппаратов. Приводится схема узлов и логика работы командно-измерительной системы с возможностью подавления интерференции. Описываются возможные варианты устройств блокировки запросного сигнала. Проводится сравнение существующих на рынке радиоэлектронных компонентов для решения данной задачи.*

**Ключевые слова:** интерференция, СВЧ-выключатели: ферритовые, p-i-n-диодные, полупроводниковые, электро-механические, микромеханические, командно-измерительная система, запросный сигнал, блокировка сигнала.

## Введение

Диаграммы направленности (ДН) антенн, установленных параллельно оси  $Z$  малых космических аппаратов (МКА), направлены в противоположные стороны для обеспечения связи в неориентированном полёте МКА. В штатном режиме работы КА антенны направлены в зенит и надир соответственно. Поскольку антенны объединены суммирующим устройством, необходимо говорить о суммарной ДН этих двух антенн.

Анализ ДН антенно-фидерного устройства (АФУ) командно-измерительной системы (КИС) показывает, что при небольших расстояниях между антеннами в МКА в суммарной ДН появляются провалы в секторах  $\pm 60^\circ - 80^\circ$  от оси антенны.

При небольшом угле места находящегося в полёте МКА (что соответствует началу или концу сеанса связи) может происходить совпадение направления приёма сигнала с минимумом суммарной ДН, что в свою очередь может спровоцировать потерю захвата запросного сигнала приёмо-передающим устройством бортовой КИС.

Появление в суммарной ДН антенн минимумов объясняется тем, что поступление фронта электромагнитной волны на две антенны, связанные суммирующим устройством, вызывает в нём процессы интерференции, результат которых зависит от разницы длин путей, пройденных фронтом волны.

Цель данной работы показать возможность использования дополнительного выключателя мощности СВЧ-сигнала для предотвращения возможной интерференции в АФУ для МКА.

## Структурная схема и логика функционирования бортовой аппаратуры КИС с возможностью подавления интерференции сигналов по запросному каналу

Для предотвращения интерференционных флуктуаций запросного сигнала можно применять управле-

мое блокирование части тракта АФУ КИС. На рис. 1 показана структурная схема КИС с возможностью блокировки, предложенная автором.

КИС состоит из трёх приёмо-передающих устройств (ППУ), выделяющих запросные сигналы и формирующих ответные сигналы, дешифратора командно-программной информации (ДКПИ), который выполняет функции дешифрации информационных посылок и управления КИС, усилителей мощности (УМ) ответных сигналов и СВЧ-устройств: делителей мощности, антенного выключателя (в запросной линии) и переключателя (в ответной линии).

Блок ДКПИ содержит в себе устройство контроля блокировки (УКБ), которое представляет собой таймер с периодом срабатывания от нескольких часов до суток, который в моменты срабатывания снимает блокировку в АФУ КИС.

Для включения блокировки и снятия блокировки используются соответствующие разовые команды,

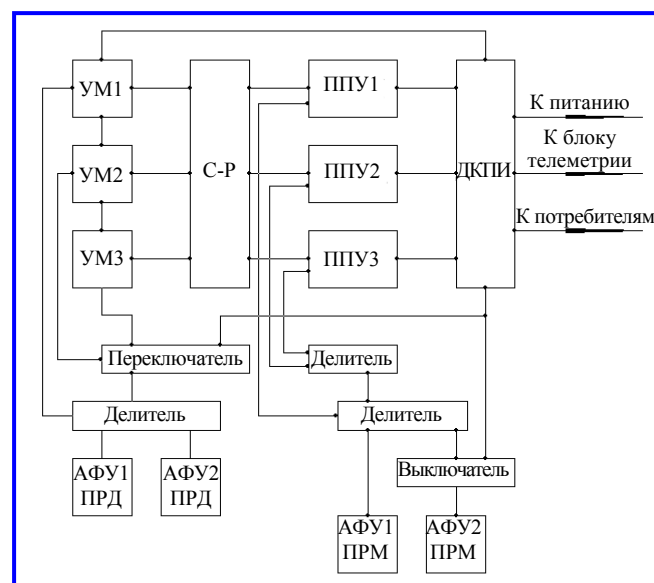


Рис. 1. Структурная схема командно-измерительной системы

при этом по команде «Установить блокировку АФУ» таймер начинает новый отсчёт до момента автоматического снятия блокировки.

Таким образом, после начала ориентированного полёта МКА с наземной станции (НС КИС) с периодичностью сеансов связи и управления следует предусматривать команду «Установить блокировку АФУ», чтобы в дальнейших сеансах связи в АФУ КИС не возникала интерференция, мешающая нормальному прохождению запросного сигнала.

### Варианты построения СВЧ-устройств блокировки

Существует несколько вариантов построения СВЧ-выключателей и переключателей, основанных на разных физических принципах: электромеханические; микроэлектромеханические (МЭМС); ферритовые; р-і-п-диодные; транзисторные.

**Электромеханические.** Электромеханическое переключение обеспечивает коммутацию при времени переключения около 6 мс. Для электромеханических коммутаторов нормируется гарантированное число циклов коммутации, которое в предлагаемых на рынке моделях колеблется от 200 тыс. до 10 млн. [1].

**Микроэлектромеханические (МЭМС).** Изделия, основанные на технологии МЭМС, имеют срок службы в 100 миллиардов циклов. Переключатели выпускаются для рабочих частот до 40 ГГц [2].

**Ферритовые.** Ферритовые переключатели на продольном магнитном поле, использующие эффект Фарадея, широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре. Принцип действия переключателей заключается в том, что внешнее магнитное поле, воздействующее на феррит, изменяется по заданному закону, вызывая изменение плоскости поляризации (или модулирование амплитуды) волны в волноводе [3].

Выключатель представляет собой прямоугольный волновод, в котором помещён ферритовый цилиндр. К цилиндру приклеены две металлические пластины, расположенные параллельно широким стенкам волновода. Феррит намагничивается продольным магнитным полем, которое создаётся катушкой, намотанной на волновод [4].

Принцип работы такого выключателя основан на зависимости коэффициента отражения от напряжённости магнитного поля.

При появлении магнитного поля, волна типа Н<sub>10</sub> преобразуется в волну Е-типа, которая не может распространяться в волноводе с металлическими пластинами, поэтому испытывает сильное отражение. Развязка при этом достигает порядка 30 дБ. В отсутствии внешнего поля феррит ведёт себя как

изотропный диэлектрик, и трансформации волны Н<sub>10</sub> не происходит. В этом режиме (режим пропускания) потери имеют порядок 0,25 дБ. Рабочая полоса частот примерно 1 – 1,5 % от несущей частоты [4] КСВН достигает величин порядка 1,4 а время переключения порядка десятков микросекунд [3].

**На р-і-п-диодах.** В последнее время в технике СВЧ широкое распространение получили регулирующие устройства на полупроводниковых р-і-п-диодах, управляемые постоянным напряжением. Основными достоинствами этих устройств являются большое быстродействие до (0,1 мкс), малая управляющая мощность (десятки милливатт), большой срок службы (до 200 000 ч) и способность работать при весьма значительных высокочастотных мощностях (импульсная мощность может достигать десятков киловатт, средняя мощность – сотен ватт). Использование р-і-п-диодов с полосковыми линиями позволяет создавать сверхминиатюрные электрически управляемые регулирующие устройства.

Эквивалентная упрощённая схема на СВЧ полупроводникового диода с р-і- и і-п-переходами (р-і-п-диода) представляет собой параллельное соединение активного сопротивления  $r_d$  и весьма малой ёмкости  $C_d$ , причём изменение напряжения смещения на диоде изменяет в  $10^2 - 10^4$  раз значение  $r_d$  и почти не влияет на  $C_d$ . Ёмкость  $C_d$  часто компенсируют параллельным подключением к р-і-п-диоду индуктивности. При прямом напряжении смещения (плюс источника соединён с областью р), сопровождаемом небольшим управляющим током через диод, р-і-п-диод обладает на СВЧ очень малым комплексным сопротивлением и в первом приближении представляет собой короткозамкнутую цепь. При нулевом или обратном напряжении смещения комплексное сопротивление р-і-п-диода становится очень большим, что в первом приближении можно считать разрывом цепи [5].

Эквивалентная схема простейшего узкополосного двухканального переключателя представлена на рис. 2.

Можно так подобрать согласующие элементы (на рисунке не показаны), что для электромагнитных волн СВЧ в узком диапазоне частот параллельно включенный р-і-п-диод будет представлять собой либо короткое замыкание линии передачи (при положительном напряжении смещения), либо очень большое сопротивление, практически не шунтирующее линию передачи (при отрицательном напряжении смещения). Пусть, например, управляющие напряжения таковы, что левый диод открыт и отражает электромагнитную волну, а правый закрыт и пропускает её. При этом на частоте  $f_0$  (которой соответствует длина волны в линии передачи  $\Lambda_0$ ) плечо 2 имеет в точках *aa* бесконечно большое сопротивление, и сигнал из плеча 1 пол-

ностью проходит в плечо 3. При противоположной полярности управляющих напряжений сигнал из плеча 1 поступает в плечо 2.

Для расширения полосы пропускания и увеличения ослабления по закрытому каналу следует использовать в каждом плече каскадное включение нескольких параллельных р-і-n-диодов через отрезки линии длиной  $\Lambda_0/4$  [5].

Схема данного антенного переключателя может быть использована и в качестве антенного выключателя. В таком случае плечо 3 нагружается на балластную нагрузку, а к плечу 2 подключается СВЧ вход приёмно-передающего устройства командно-измерительной системы.

**Транзисторные.** Транзисторные выключатели в настоящее время выполняются в виде монолитной интегральной схемы, выполненной по GaAs-pHEMT-технологии (в различных источниках такие СВЧ-выключатели могут обозначаться как «выключатели на полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ)» или «GaAs MESFET SPST switch» – в зарубежной литературе).

Полоса рабочих частот 0 – 20 ГГц, начальные вносимые потери 2,2 дБ на частоте 20 ГГц, уровень развязки 27 дБ, возвратные потери по входу/выходу не менее 15 дБ. Сигнал управления – аналоговое напряжение от –3 до 0 В [6].

На рис. 4 представлена эквивалентная схема СВЧ-аттенюатора (выключателя), в которой ПТШ VT1 – VT4 работают в режиме управляемого сопротивления канала.

Резисторы R1 и R2 обеспечивают согласование входа и выхода аттенюатора при работе в режиме больших ослаблений, а также линеаризуют закон изменения сопротивления последовательного плеча при работе в режиме большого сигнала. Высокоомные отрезки линий на входе и выходе аттенюатора, которые на эквивалентной схеме представлены в виде индуктивностей L1 и L5, служат для улучшения согласования. Индуктивность L3 в режиме минимально вносимых ослаблений совместно с паразитными ёмкостями закрытых транзисторов

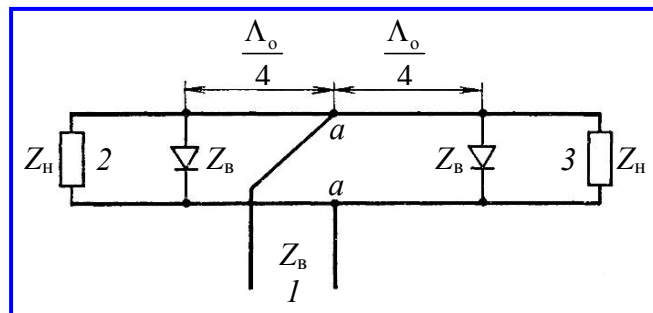


Рис. 2. Переключатель на р-і-n-диодах

VT2 и VT3 образуют П-образное звено ФНЧ, что позволяет снизить неравномерность коэффициента передачи в рабочей полосе частот. В режиме максимально вносимых ослаблений данная индуктивность компенсирует влияние паразитных ёмкостей закрытых транзисторов VT1 и VT4, увеличивая вносимые ослабления в диапазоне верхних частот. Высокоомные отрезки линий, которые на эквивалентной схеме представлены в виде индуктивностей L2 и L4, служат для коррекции неравномерности коэффициента передачи в режиме максимально вносимых ослаблений [6].

Входы V1, V2 используются для задания режимов работы полевых транзисторов шоттки. Можно подобрать дискретные значения напряжений так, чтобы схема имела всего два состояния открытое и закрытое, что и требуется для выключателя СВЧ-сигналов в приёмном устройстве.

### Сравнительные характеристики существующих на рынке СВЧ-выключателей

В таблице отображены сравнительные характеристики типичных СВЧ-выключателей, доступных на рынке.

Все приведённые варианты выключателей имеют разъёмы типа SMA (для RADANT MEMS RMSW101 при наличии специального корпуса – адаптера).

На устройства для космических применений налагают дополнительные требования, такие как повышенная радиационная устойчивость, виброустойчивость,

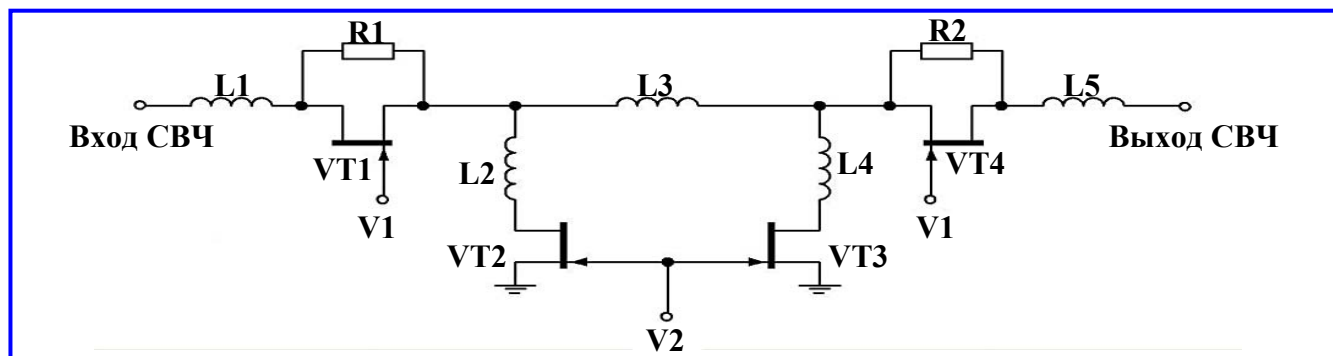


Рис. 3. Эквивалентная схема СВЧ-выключателя на ПТШ

**Характеристики существующих на рынке СВЧ-выключателей**

Тип. Название образца	Диапазон рабочих частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	Уровень максимального ослабления, дБ	Скорость переключения	$T_{\text{эклп}}$ град	Примечание
Электромеханический. Radial R570443030 SPDT [7]	0 – 18	0,3	70	10 мс	–40 – 85	Потребляет энергию только в момент переключения, 80 мА при 30 В питания
Микромеханический (MEMS). RADANT MEMS RMSW101 (SPST) [8]	0 – 12	0,5	27	10 мкс	–40 – 85	Выпускается в виде микросхемы, требует установки в специальный корпус с СВЧ-коннекторами (N,SMA). Напряжение «On» 90 В, мощность < 1 нВт, 0 В – «Off»
На р-і-п-диодах. Pasternack PE7113 (SPDT) [9]	1 – 18	3,1	65	100 нс	–65 – 100	Напряжения питания +5 В, –15 В. Управление ТТЛ – уровнями
Транзисторный. (MESFET GaAs) Hittite HMC-C019 SPST [10]	0 – 20	3	80	8,5 нс	–55 – 85	Напряжение питания +5 В, ток 2,8 мА. Напряжение лог «1» открытое состояние от +3,5 В с током 1 мА, лог «0» закрытое состояние до +1,5 В с током 20 мкА (управление CMOS-уровнями)

особый температурный режим, большой срок безотказной работы (8 – 10 лет). После прохождения соответствующих испытаний аппаратуре присваиваются сертификаты, подтверждающие испытания и возможность применения в космической промышленности.

Из вариантов, представленных в таблице, можно отметить, что по частотным, температурным и скоростным характеристикам удовлетворяют все варианты выключателей. Вносимые потери в размере 3 дБ существенно ограничивают применимость устройств на р-і-п-диодах и транзисторах. Более слабая развязка у МЭМС-выключателя и отсутствие стандартизованного исполнения может быть критичной для эксплуатации в применении для выключателя в приёмно-передающем тракте КИС.

Ферритовые выключатели, по-видимому, нельзя использовать для решения данной задачи, поскольку они выполняются в виде волновода, который придётся снабжать дополнительными переходами между разъёмами существующих приёмно-передающих устройств КИС, также следует отметить, что рабочие частоты в волноводных выключателях выше, чем требуется для работы КИС. Большие габаритные размеры, постоянные токи подмагничивания, отсутствие широкого распространения на рынке тоже являются отрицательным фактором.

**Выводы**

На данный момент для решения поставленной задачи подавления интерференции запросного сигнала в МКА более простым в реализации и управлении

является первый тип выключателя – электромеханический, однако отсутствие движущихся частей в вариантах на р-і-п-диодах и полевых транзисторах может быть перспективным при улучшении характеристик данных устройств в части вносимых потерь.

**Литература**

1. Аттенуаторы СВЧ-сигналов / Л. А. Белов // ЭЛЕКТРОНИКА : Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – № 2. – С. 32 – 38.
2. СВЧ-переключатели по технологии МЭМС : [Электронный ресурс]. – ООО «Радиокомп». – режим доступа : <http://www.radiocomp.ru>.
3. Элементы радиоэлектронной аппаратуры / В. Н. Боголюбов, А. В. Ескин, С. Б. Карбовский. – М. : Советское радио, 1972. – 36 с.
4. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах / А. Л. Микаэлян. – М. : Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1963. – С. 622 – 623.
5. Фальковский О. И. Техническая электродинамика : учебник / О. И. Фальковский. – 2-е изд. – СПб. : М. : Краснодар : Издательство «Лань», 2009. – С. 400 – 402.
6. GaAs МИС управляемого СВЧ-аттенуатора : доклады ТУСУР / А. А. Баров, А. В. Кондратенко, Д. С. Хохол. – № 2 (22). – часть 2. – декабрь 2010. – С. 187.
7. Radial Microwave components technical data sheet R570443030 (SPDT) : [Электронный ресурс]. – режим доступа : <http://www.radiall.com>.
8. RADANT MEMS technical data sheet RMSW101 (SPST) : [Электронный ресурс]. – режим доступа : <http://www.radantmems.com>.
9. Pasternack technical data sheet PE7113 (SPDT) : [Электронный ресурс]. – режим доступа : <http://www.pasternack.com>.
10. Hittite Microwave Corporation technical data sheet HMC-C019 (SPST) : [Электронный ресурс]. – режим доступа : <http://www.hittite.com>.

Поступила в редакцию 24.12.2013

Игорь Сергеевич Лавриненков, инженер, т. (495) 623-32-00, e-mail: [Lis-soft@rambler.ru](mailto:Lis-soft@rambler.ru).