

# ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ПЕРЕДАТЧИКА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Предложена конструкция беспроводного передатчика телеметрической информации, которая позволяет передавать данные на расстояние до 60 км. Эта система использует сантиметровый радиочастотный диапазон (СВЧ), передача данных осуществляется BPSK-модуляцией. Конструкция передатчика включает модули обработки и усиления с посекционной техникой экранирования СВЧ. Передатчик оснащен цифровыми каналами через интерфейсы UART, CAN и Ethernet.

## ВВЕДЕНИЕ

В век высоких технологий практическая потребность народного хозяйства, легкой и тяжелой промышленности, вооруженных сил и других отраслей в системах дистанционного измерения параметров, характеризующих состояние объекта или процесса, и дистанционного управления ими возросла многократно. Использование систем беспроводного дистанционного измерения и управления позволяет значительно повысить эффективность работы любой системы, а значит, и конкурентоспособность на рынках страны и мира, что в конечном счете способствует достижению поставленной цели [1].

Зарубежные исследователи и производители в области беспроводных техно-

логий ушли далеко вперед. Однако это направление исследований сравнительно молодое, и было бы неверно утверждать, что оптимальные принципы разработки систем на их основе уже окончательно сформированы и единогласно признаны всеми специалистами в мире.

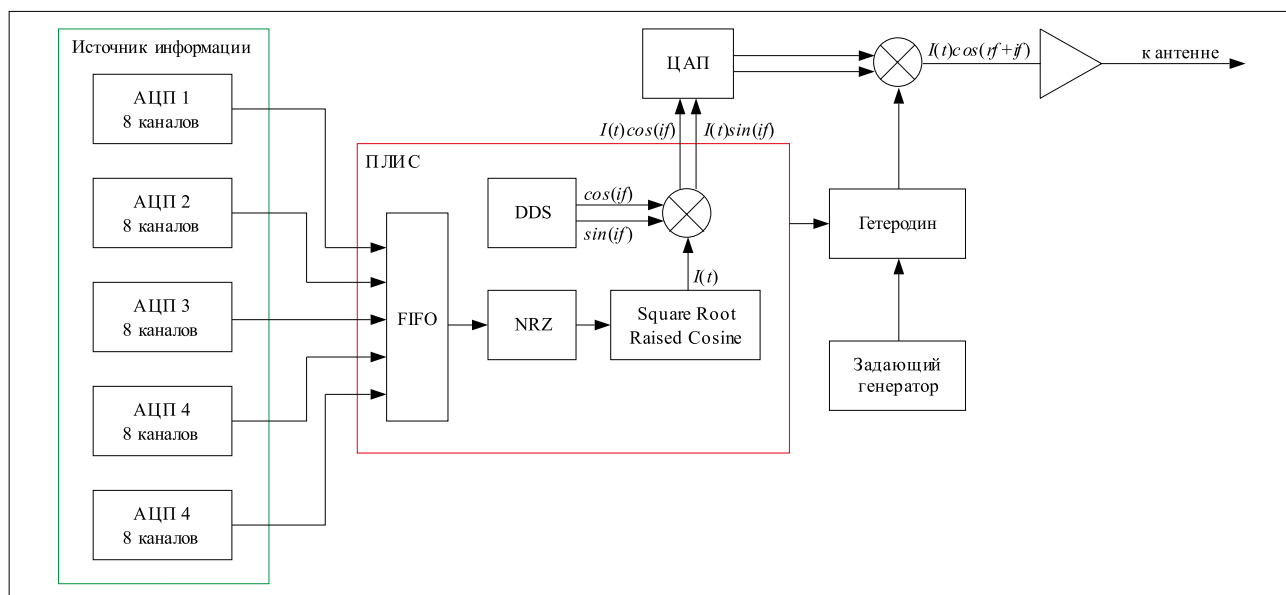
Система беспроводного телеизмерения и телеуправления, или, как ее еще называют, система телемеханики, является основным звеном любой автоматизированной системы, выполняющей информационные и управленческие функции. Контроль и управление осуществляется из центра управления, который может находиться на значительном расстоянии от объекта [2].

Таким образом, системы беспроводной телеметрии позволяют дистанцион-

но управлять, контролировать и оптимизировать параметры в процессе разработки и эксплуатации различного рода объектов.

## ОСОБЕННОСТИ СХЕМЫ И КОНСТРУКЦИИ

Беспроводной передатчик телеметрической информации построен по одной из классических схем радиопередатчиков, который использует квадратурное преобразование и BPSK-модуляцию для передачи данных [3]. Диапазон питающих напряжений 18–32 В, потребление 100 Вт. Система обеспечивает сбор данных по 40 аналоговым каналам. Максимальная амплитуда принимаемых сигналов может достигать 30 В с разрешением 0,001 В, частота выборки 10 кГц,



▲ Рис. 1. Функциональная схема модуля телеметрии

мощность радиосигнала на выходе блока составляет 40 дБм. Функциональная схема устройства приведена на рис. 1.

Помимо аналоговых каналов, передатчик оснащен цифровыми каналами через интерфейсы UART, CAN и Ethernet.

При формировании сигнал проходит ряд стандартных процедур:

Кодирование без возврата к нулю (NRZ)

$$S_{NRZ}(t) = \begin{cases} 1, & s(t) = 1 \\ -1, & s(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Пример NRZ-кодирования представлен на рис. 2.

Формирование фильтром типа «приподнятый косинус»

$$f(x) = \begin{cases} 1 & |f| < 2W_0 - W \\ \cos^2\left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{|f| + W - 2W_0}{W - W_0}\right) & 2W_0 - W < |f| < W \\ 0 & |f| > W \end{cases} \quad (2)$$

где  $W$  — максимальная ширина полосы;  $W_0 = 1/2T$  — минимальная ширина полосы по Найквисту для прямоугольного спектра.

Характеристика типа приподнятого косинуса и его импульсных отклик для различных  $r = (W - W_0)/W_0$  представлена на рис. 3.

Перенос на промежуточную частоту происходит в ПЛИС методом прямого цифрового синтеза, затем проводится интерполяция сигнала до частоты работы ЦАП. На выходе ЦАП получают квадратуры сигнала на промежуточной частоте:

$$I(t) \cdot \cos(f_{if}t), I(t) \cdot \sin(f_{if}t) \quad (3)$$

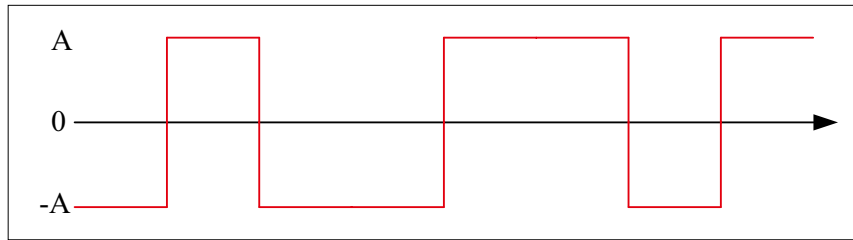
Выход квадратурного смесителя описывается уравнением:

$$I \cdot \cos(f_{if}t) + Q \cdot (-\sin(f_{if}t)) \quad (4)$$

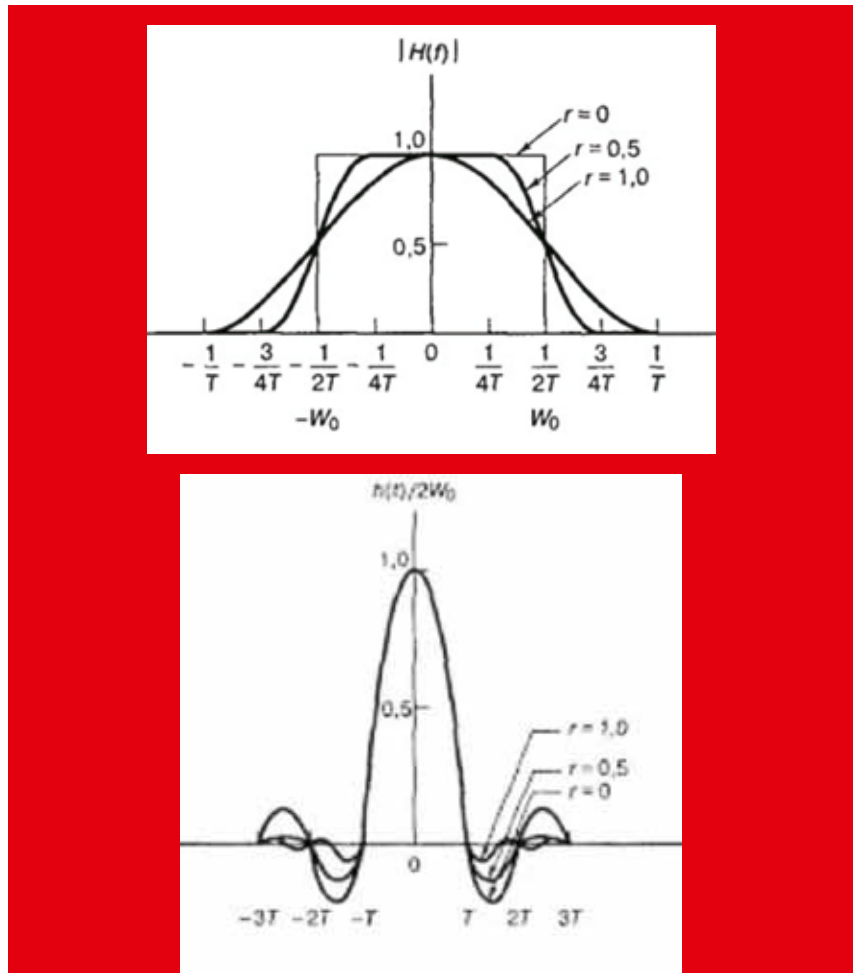
Использование BPSK позволило существенно подавить зеркальный канал. Математически это выражено в следующем:

$$\begin{aligned} I(t) \cdot \cos(f_{if}t) \cdot \cos(f_{if}t) + I(t) \cdot \sin(f_{if}t) \cdot (-\sin(f_{if}t)) = \\ = \frac{I(t)}{2} (\cos((f_{if} + f_{if})t) + \cos((f_{if} - f_{if})t)) + \\ + \frac{I(t)}{2} (\cos((f_{if} + f_{if})t) - \cos((f_{if} - f_{if})t)) = \\ = I(t) \cos((f_{if} + f_{if})t) \quad (5) \end{aligned}$$

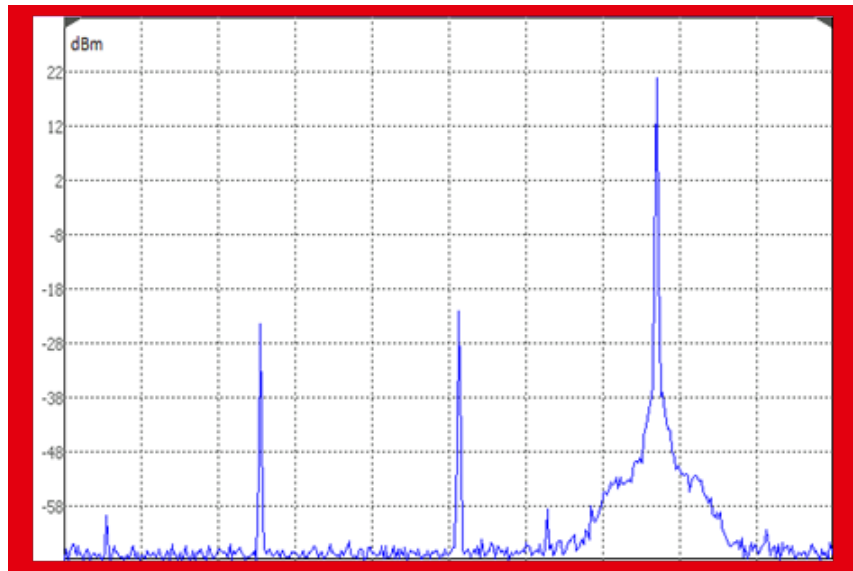
Аналитически получилось полное подавление зеркального канала, в реальном устройстве за счет использования квадратурного сигнала удалось подавить зеркальную составляющую и несущую более чем на 40 дБ, в то время как стандартное подавление квадратурного смесителя составляет порядка 20–25 дБ. Результат



▲ Рис. 2. NRZ-кодирование



▲ Рис. 3. Характеристика типа приподнятого косинуса и его импульсный отклик



▲ Рис. 4. Спектр монохромного сигнала на выходе блока телеметрии

изображен на рис. 4. Оценка подавления производилась по монохромному сигналу на выходе передатчика телеметрии с аттенюатором 20 дБ.

Основная сложность конструкции передатчика заключается в объединении цифровой и аналоговой части в одном устройстве. Для предотвращения влияния цифровой части на аналоговый тракт применялась посекционная техника экранирования СВЧ [4], а также топологическое разделение областей печатной платы. Общий вид конструкции передатчика телеметрии изображен на рис. 5.

Помимо обработки и передачи различных диагностических сигналов, передатчик способен транслировать координаты местоположения. Данный передатчик телеметрии оборудован GPS/ГЛОНАСС-модулем и входом для подключения пассивной либо активной антенны.

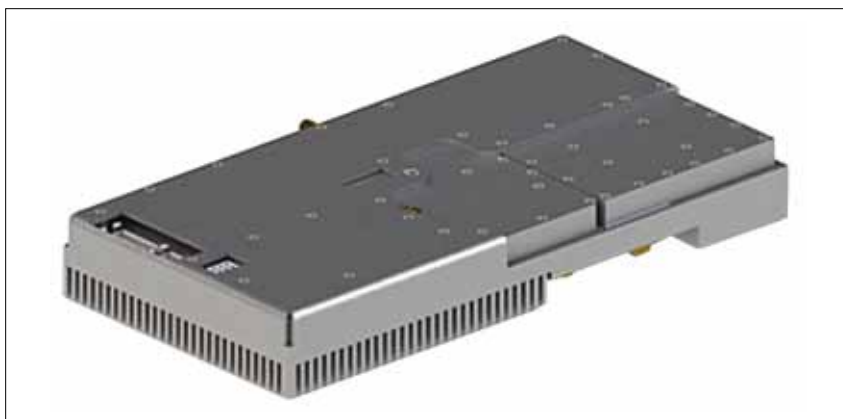
Диапазон рабочих температур передатчика находится в пределах  $-40...+60$  °С. Передатчик способен выдерживать одиночные удары до 30g и воздействие широкополосной случайной вибрации 12g RMS в диапазоне 20 Гц...1 кГц. В зависимости от исполнения масса передатчика варьируется в пределах 1,2–2,2 кг.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-ТРАКТА УСИЛИТЕЛЯ

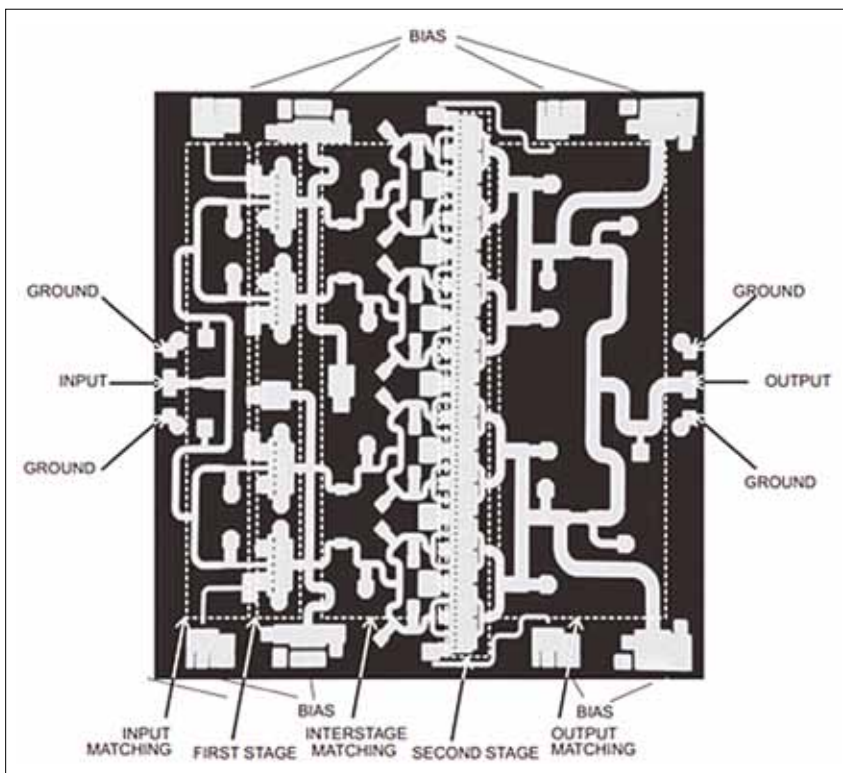
Одной из основных проблем в процессе разработки передатчика телеметрии стало проектирование СВЧ-усилителя. В процессе разработки был решен ряд инженерных задач:

- расчет коэффициента усиления тракта и подбор элементной базы;
- подвод питания к оконечному каскаду;
- разработка направленного отвода для детектора выходной мощности;
- согласование оконечного каскада с антенно-фидерной системой;
- экранирование.

Весь усилительный тракт передатчика телеметрической информации построен на внутренне согласованных транзисторах, что позволяет значительно экономить место на плате. Преимущество внутренне согласованных транзисторов заключается в том, что все цепочки согласования выполнены на кристалле, в отличие от несогласованных. Структура внутренне согласованного транзистора приведена на рис. 6 [7]. На нем выделены области (input matching, output matching) цепочек согласования, которые расположены по входу и выходу кристалла усилителя. При расчете усилительного тракта принимались во внимание коэффициенты усиления и максимальные входные и выходные мощности каждого звена



▲ Рис. 5. Блок телеметрии



▲ Рис. 6. Структура внутренне согласованного усилителя

с учетом точек компрессии IP1 и потерь в тракте [6]. Наиболее значимыми являются потери на излучение и отражение. Потери на отражение возникают при рассогласовании сопротивления источника сигнала или нагрузки с линией передачи. Полное характеристическое сопротивление линии передачи описывается выражением [5]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (6)$$

где  $R$  — сопротивление линии;  $G$  — проводимость линии;  $L$  — индуктивность линии;  $C$  — емкость линии.

Зная характеристическое сопротивление линии передачи, сопротивление источника сигнала и нагрузки, можно рассчитать коэффициенты отражения для входной и выходной цепочек усилителя:

$$\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0}; \Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (7)$$

где  $\Gamma_s$  — коэффициент отражения для источника сигнала;  $\Gamma_L$  — коэффициент отражения для нагрузки;  $Z_s$  — сопротивление источника сигнала;  $Z_L$  — сопротивление нагрузки.

Любой усилитель описывается матрицей S-параметров. Для каждого внутренне согласованного усилителя эти параметры приводятся в технической документации для определенной полосы частот, в которой он согласован. Проектирование печатной платы выполнялось в пакете Mentor Graphics. Данный пакет позволяет рассчитывать характеристическое сопротивление линии. Таким образом, зная коэффициенты отражения и S-параметры усилителя, можно рассчи-

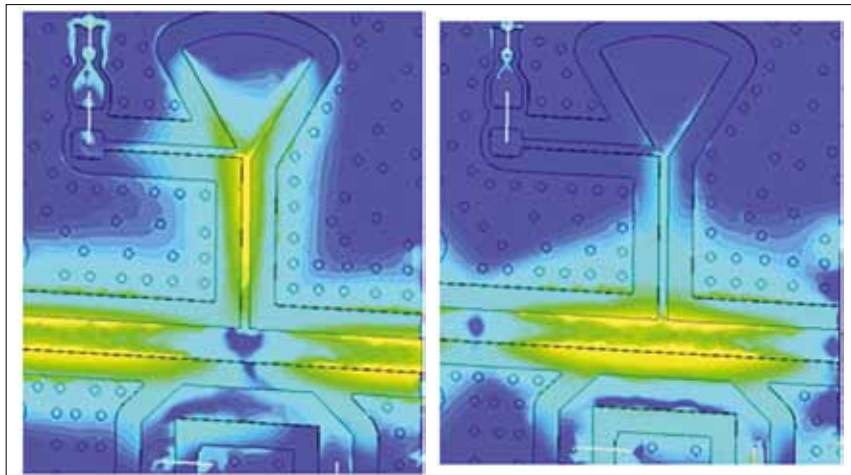
тать коэффициент усиления по следующей формуле [7]:

$$G_T = |S_{21}|^2 \cdot \frac{(1-|\Gamma_S|^2) \cdot (1-|\Gamma_L|^2)}{|(1-\Gamma_S \cdot S_{11}) \cdot (1-\Gamma_L \cdot S_{22}) - \Gamma_L \cdot \Gamma_S \cdot S_{12} \cdot S_{21}|^2} \cdot (8)$$

В случае, когда нас интересует мощность, переданная в нагрузку, то есть в одном направлении (от входа усилителя к выходу), можно принять что  $\Gamma_S = S_{11}$  и  $\Gamma_L = S_{22}$ ,  $S_{12} = 0$ , тогда выражение (8) будет записано в следующем виде [7]:

$$G_T = |S_{21}|^2 \cdot \left( \frac{1}{1-|S_{11}|^2} \right) \cdot \left( \frac{1}{1-|S_{22}|^2} \right) \cdot (9)$$

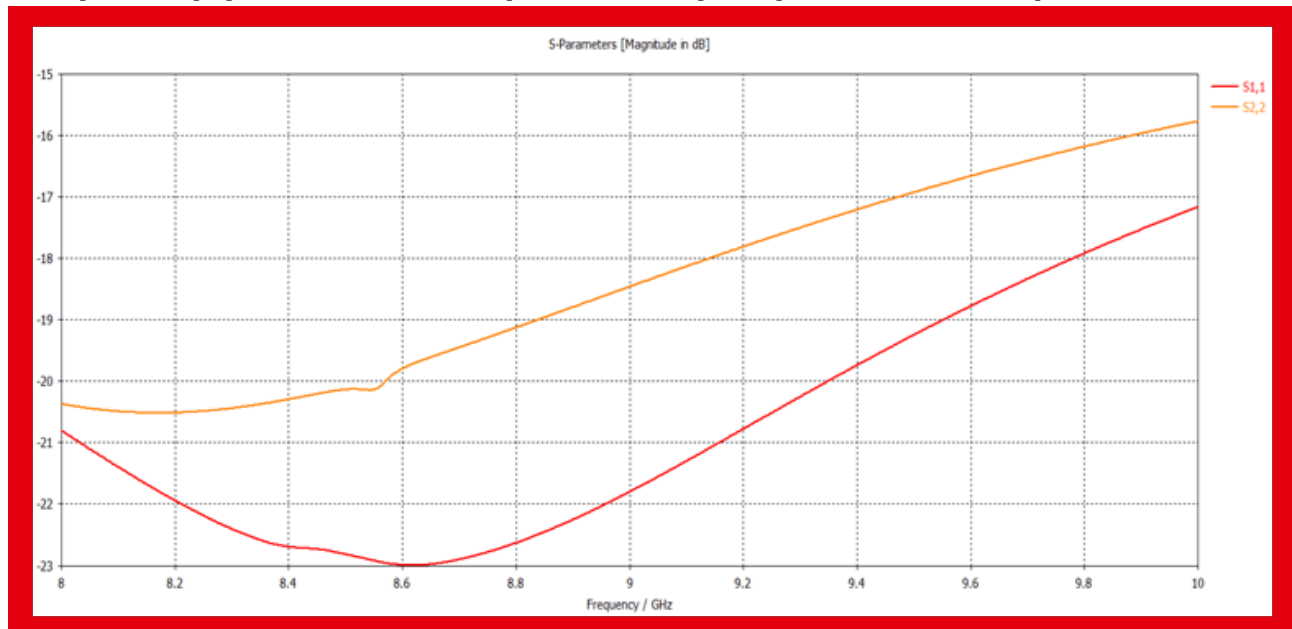
Для оптимального выбора конфигурации топологии подвода питания и оценки качества согласования тракта с антенно-фидерной системой было применено моделирование в программном комплексе CST Studio. На рис. 7 изображен процесс протекания СВЧ-энергии в тракте.



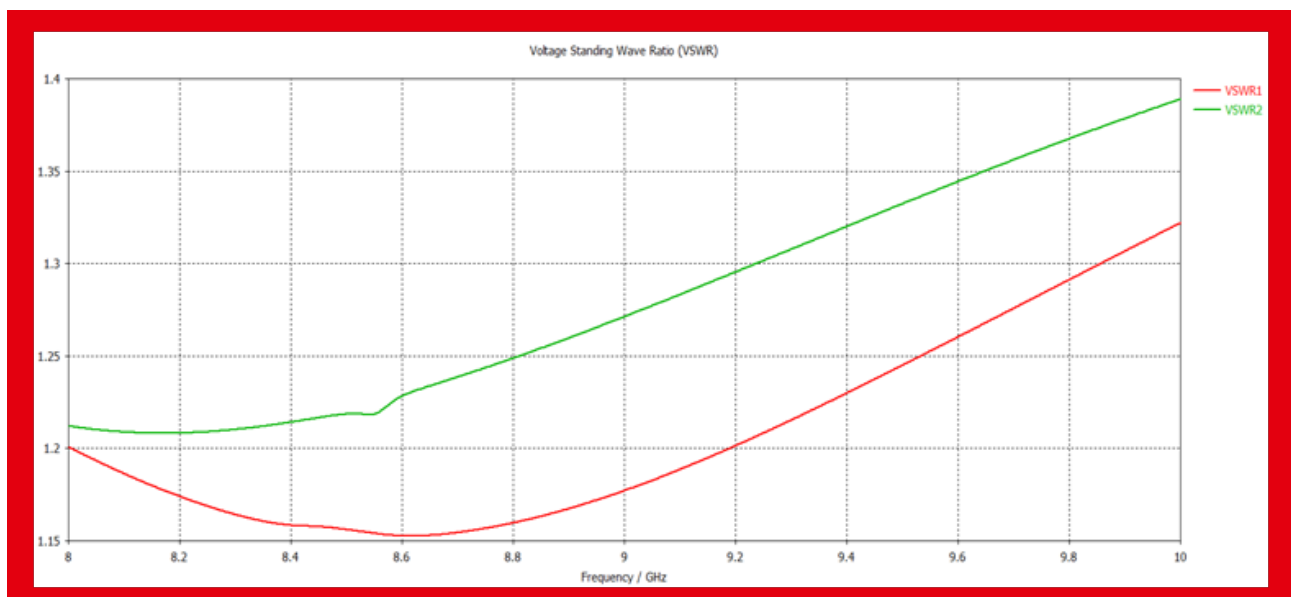
▲ Рис. 7. Моделирование подвода питания СВЧ-тракта оконечного усилителя

На рис. 7 видно, что энергия практически не проникает в цепь пода-

вления СВЧ-энергии в тракте.



▲ Рис. 8.  $S_{11}$  и  $S_{22}$  линии передачи в полосе 2 ГГц



▲ Рис. 9. КСВ по входу (VSWR1) и выходу (VSWR2) линии передачи в полосе 2 ГГц

чи питания из-за образования стоячей волны в питающем подводе, обеспечивая минимальные потери. На рис. 8, 9 изображены графики S-параметров и КСВ, полученных в результате моделирования.

Из графиков, изображенных на рис. 8 и 9, видно, что в рабочей полосе потери составляют порядка 0,1 дБ. КСВ выходного тракта с 50-Ом фидерной системой не хуже 1,35 в рабочей полосе. Таким образом, при данной системе подвода питания обеспечивается максимальная выходная мощность, составляющая 40 дБм. Коэффициент передачи тракта составляет 45 дБ, точка копрессии по входу –5 дБм.

Полученные в процессе моделирования S-параметры полностью характеризуют потери в выходном тракте усилителя.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный беспроводной передатчик телеметрии способен обеспечивать трансляцию диагностической информации с различного рода аппаратуры на расстояние до 60 км (в зависимости от коэффициента усиления

антенны) и передавать координаты местоположения. Различные исполнения передатчика телеметрии позволяют ему функционировать как в непрерывном, так и в кратковременном режиме. Устойчивость данного передатчика к механическим воздействиям разрешает применять его не только в стационарном наземном оборудовании и промышленных объектах, но и на подвижных объектах и летательных аппаратах.

За счет объединения в одном устройстве цифрового и аналогового тракта данный передатчик является самодостаточным устройством, способным собирать и передавать информацию, не требуя дополнительного подключения к радиотракту. Помимо этого, передатчик имеет еще одно преимущество, которое заключается в его низкой массе и компактном исполнении, при дальности передачи радиосигнала порядка 60 км, а за счет применения кратковременного режима работы возможно снизить массу прибора до 1,2 кг, что позволяет применять его в аппаратах, критичных к массе оборудования.

Наличие большого количества обрабатываемых каналов, компактные размеры и большая дальность передачи сигнала дают преимущество данному модулю перед аналогичными изделиями зарубежных производителей таких фирм, как Imc (Нидерланды), Mantracourt (Англия), и некоторых российских производителей. ●

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гугалов К. Г., Любомудров Д. Ю. *Новые возможности транкинговой связи*//Вестник связи. 1996. № 1.
2. Назаров А. В. *Современная телеметрия в теории и практике*. СПб, Наука и техника, 2007.
3. Sklar B. *Digital Communication. Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall PTR, 2001.
4. Воробьев Е. А. *Экранирование СВЧ-конструкций*. М.: Советское радио, 1979.
5. Gonzalez G. *Microwave transistor amplifiers. Analysis and Design*, Prentice-Hall, 1984.
6. Sayre C W. *Complete wireless design*. McGraw-Hill Telecom, 2004.
6. Steer M. *Microwave and RF Design*. North Carolina State University. SciTech Publishing, 2010.