

УДК 629.372413.47.45.99 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.47.51

## Микрополосковое устройство перекрестного резервирования $2 \times 3$ ( $3 \times 2$ ) для бортовой аппаратуры командно-измерительной системы

**В. Г. Алыбин**, *д. т. н., otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**С. А. Зарапин**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**А. С. Семочкин**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**С. В. Авраменко**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**С. А. Яхутин**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Аннотация.** Рассмотрены типы микрополосковых устройств перекрестного резервирования размерностью  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ) для бортовой аппаратуры командно-измерительной системы с точки зрения удовлетворения основных требований, предъявляемых к ним. Предложен новый тип микрополоскового делителя мощности на основе комбинации моста Ланге, направленного ответвителя Ланге и делителя мощности Уилкинсона. Рассмотрен принцип его действия, приведены расчетные характеристики, показаны преимущества перед известными устройствами этого класса: максимальный коэффициент передачи — минус 4,76 дБ, развязка между входами — не менее 28 дБ и КСВН входов и выходов — не более 1,4 дБ в полосе частот 12%, компактность и относительная простота конструкции.

**Ключевые слова:** микрополосковый делитель мощности  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ), мост Ланге, направленный ответвитель Ланге, делитель мощности Уилкинсона  $1 \times 2$ , отрезок микрополосковой линии, переходное ослабление, коэффициент передачи, КСВН

## The Microstrip Device of Cross Redundancy $2 \times 3$ ( $3 \times 2$ ) for Onboard Equipment of a Command and Measurement System

**V. G. Alybin**, *Dr. Sci. (Engineering), otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**S. A. Zarapin**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. S. Semochkin**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**S. V. Avramenko**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**S. A. Yakhutin**, *otdelenie17@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The paper considers the types of microstrip devices of cross redundancy with the dimension  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ) for onboard equipment of a command and measurement system from the point of view of meeting the basic requirements applied to them. The new type of a microstrip power divider based on combination of the Lange bridge and directional Lange coupler and Wilkinson power divider is offered. The principle of its action is considered and design characteristics are given. The advantages over the known devices of this class are shown: the maximum transmission factor is  $-4.76$  dB, isolation between the inputs is not less than 28 dB, VSWR of the inputs and outputs is not more than 1.4 dB in a frequency band of 12%, and compactness and relative simplicity of a design.

**Keywords:** microstrip power divider of  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ), Lange bridge, directional Lange coupler, Wilkinson power divider  $1 \times 2$ , piece of a microstrip line, coupling factor, transmission factor, VSWR

## Введение

В бортовой аппаратуре командно-измерительной системы (БА КИС) космических аппаратов (КА) обеспечение большого срока активного существования достигается резервированием отдельных составных частей, между которыми устанавливаются устройства перекрестного резервирования (УПР). К ним предъявляются специфические требования:

- размерность УПР —  $m \times n$ , где  $m$  — количество входов (выходов),  $n$  — количество выходов (входов), при этом  $m$  и  $n$  приобретают значения от двух до четырех;
- максимальные коэффициенты передачи, если  $m$  и  $n$  не более двух — минус 3 дБ, если не более трех — минус 4,76 дБ, если не более четырех — минус 6 дБ (без учета потерь в микрополосковых проводниках и устройствах);
- обеспечение развязки между входами — не менее 20 дБ;
- расположение входов и выходов на противоположных сторонах УПР;
- простота и технологичность конструкции;
- малые габариты;
- высокая надежность УПР, особенно во время старта КА, обеспечиваемая малыми габаритами подложек УПР.

Цель работы — продемонстрировать простоту и технологичность конструкции, малые габариты УПР, повышение надежности УПР с размерностью  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ).

В статье обсуждаются УПР размерностью  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ) как наиболее труднореализуемые среди других типов УПР и предложенный авторами новый микрополосковый делитель мощности  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ).

## УПР — делитель мощности $2 \times 3$ ( $3 \times 2$ )

Ниже показаны схемы микрополосковых УПР с размерностью  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ), широко применяемые в БА КИС для КА [1] и предложенные авторами [1, 2]. УПР, показанное на рис. 1, представляет собой делитель мощности на сочетании мостов [1, 3] и делителя мощности  $1 \times 2$  [4].

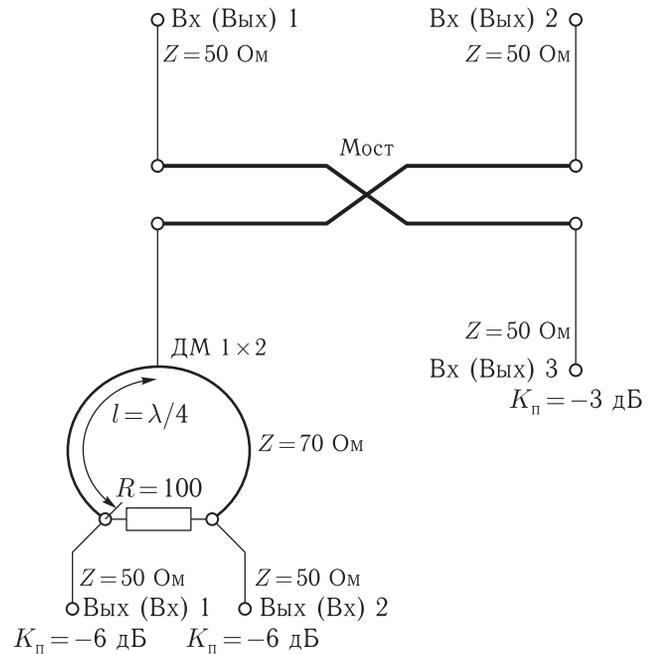


Рис. 1. Устройство перекрестного резервирования  $2 \times 3$  с коэффициентом передачи минус 6 дБ [1]

Чаще всего такое УПР представляет собой не единый функциональный узел, а два устройства: мост располагается в антенно-фидерном устройстве (АФУ), содержащем кабели и фильтры, а делитель мощности  $1 \times 2$  — между АФУ и входами приемопередающего устройства (ППУ).

Недостатком такого УПР является низкий коэффициент передачи, обусловленный построением УПР в виде бинарной схемы, в которой коэффициент передачи без учета потерь составляет минус 6 дБ вместо минус 4,76 дБ.

Другим недостатком этого типа УПР, особенно при раздельном размещении моста и делителя  $1 \times 2$ , является неизбежность дополнительных потерь в соединяющем их кабеле.

УПР (делитель мощности), схема которого представлена на рис. 2, содержит два моста Ланге, один направленный ответвитель Ланге с переходным ослаблением 4,76 дБ и три микрополосковых проводника, соединяющих мосты и направленный ответвитель. Длина одного из них больше суммы длин двух других микрополосковых проводников на 0,2 средней длины волны рабочего диапазона. Один из трех входов делителя через сопротивление  $R_{\pi}$  заземлен.

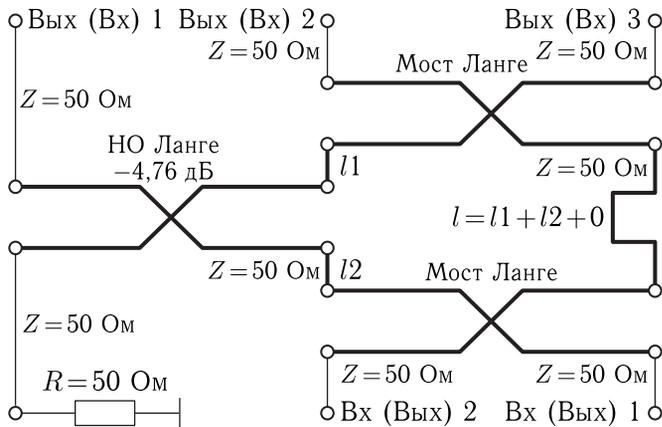


Рис. 2. Устройство перекрестного резервирования  $2 \times 3$  с коэффициентом передачи минус 4,76 дБ [1]

Достоинством делителя  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ), схема которого показана на рис. 2, является то, что он имеет максимальный коэффициент передачи минус 4,76 дБ (без учета потерь в микрополосковых элементах). Входы и выходы делителя могут быть направлены на противоположные стороны диэлектрической подложки, на которой они размещены.

Делитель мощности  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ), схема которого показана на рис. 3, отличается от делителя, представленного на рис. 2, тем, что вместо одного из мостов Ланге применен делитель мощности Уилкинсона  $1 \times 2$ , а длина одного из трех проводников равна сумме двух других. Таким образом, этот делитель  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ) компактней делителя, показанного на рис. 2, проще по конструкции, т. к. в нем не нужно применять более сложный в изготовлении мост Ланге, чем делитель  $1 \times 2$  ( $2 \times 1$ ) Уилкинсона, и потому, что балластный резистор  $R_6$  не требует заземления, что также технологически проще.

На рис. 4 приведены топологии двух делителей мощности С-диапазона частот, из которых наглядно видны преимущества нового делителя мощности, показанного на рис. 4, б.

Делитель мощности  $2 \times 3$  работает следующим образом. Входной сигнал подается на вход 2 (точка 3 ДМ) или на вход 1 (точка 3 НО) (см. рис. 3).

Если входной сигнал подан на вход 2, он распространяется двумя путями. Один путь: 3 ДМ — 2 ДМ — 4 НО, после чего — 2 НО, т. е. выход 3 и 1 НО — 3 М — 1 М и 2М, т. е. выходы 1 и 2. Другой путь: 3 ДМ — 1 ДМ — 4 М — 2 М и 1 М,

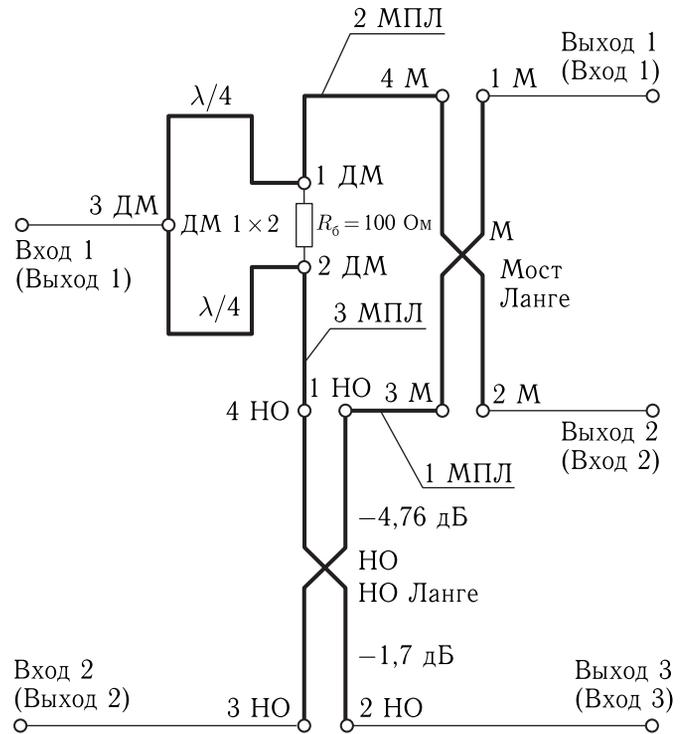


Рис. 3. Предлагаемое компактное устройство перекрестного резервирования — делитель мощности  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ) с коэффициентом передачи минус 4,76 дБ [2]

т. е. выходы 1 и 2. На 3 НО, т. е. на вход 1, входной сигнал не поступает.

Анализ коэффициентов передачи входного сигнала по всем выходам и входу 1 делителя мощности  $2 \times 3$  при условии пренебрежения потерями в мосте, направленном ответвителе и в отрезках микрополосковой линии, а также в предположении одинаковых сдвигов фаз при прохождении сигналов в М и НО, сводится к следующему. Коэффициенты передачи входного сигнала, распространяющегося по одному пути, составляют: минус 3 дБ в ДМ, минус 4,76 дБ в НО и минус 3 дБ в М. Таким образом, часть входного сигнала, попадающая на выходы 1 и 2 делителя мощности  $2 \times 3$ , имеет коэффициент передачи минус 10,76 дБ. Коэффициенты передачи входного сигнала на выход 3 делителя мощности  $2 \times 3$  составляют минус 3 дБ в ДМ и минус 1,76 дБ в НО, т. е. минус 4,76 дБ. Коэффициенты передачи входного сигнала по другому пути составляют минус 3 дБ в ДМ и минус 3 дБ в М, т. е. минус 6 дБ на выходах 1 и 2 делителя мощности  $2 \times 3$ .

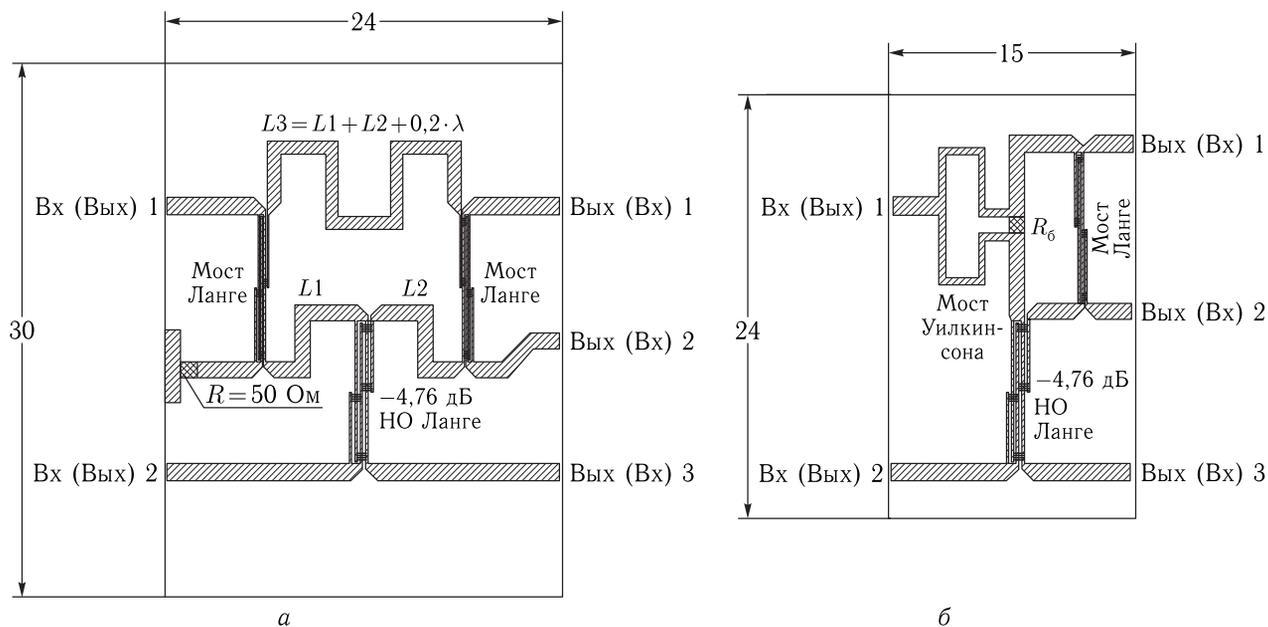


Рис. 4. Топология известного (а) [1] и предложенного (б) [2] делителей мощности

При соблюдении равенства фаз коэффициентов передачи напряжения на средней частоте рабочего диапазона частот, приведенных к входам 3 М и 4 М, векторы напряжения сигналов на выходе 1 и выходе 2 соответственно будут складываться с учетом разности фаз между ними  $\pi/2$ , при этом значение коэффициентов передачи пути 3 ДМ — 1 М и 2 М делителя мощности  $2 \times 3$  составляет минус 4,76 дБ.

Для обеспечения синфазного сложения двух частей входного сигнала, поступающего на 1 М или 2 М, необходимо обеспечить равенство электрических длин 2 МПЛ и суммарной электрической длины 1 МПЛ и 3 МПЛ.

Если входной сигнал поступает на вход 1 делителя мощности  $2 \times 3$ , он распространяется на выходы двумя путями. Один путь: 3 НО — 2 НО, т.е. выход 3, и при этом коэффициент передачи равен 4,76 дБ. Другой путь: 3 НО — 1 НО — 3 М, после чего — 2 М и 1 М, т.е. выходы 1 и 2 делителя мощности  $2 \times 3$ .

Коэффициенты передачи составляют в НО минус 1,76 дБ и в М — минус 3 дБ; на выходах 1 и 2 делителя мощности  $2 \times 3$  коэффициенты передачи составляют минус 4,76 дБ. Входной сигнал, распространяющийся по другому пути, не поступает на 4 М и, соответственно, на вход делителя мощности  $2 \times 3$ .

Таким образом, в предложенном делителе мощности  $2 \times 3$  при поступлении входного сигнала на один из двух его входов осуществляется равномерное деление мощности между его выходами с коэффициентом передачи минус 4,76 дБ и развязка между двумя входами.

Поскольку предложенный делитель мощности  $2 \times 3$  является взаимным устройством, все его свойства сохраняются при замене его выходов на входы, а входов на выходы. При этом сохраняется равномерность деления входного сигнала, поступающего на один из трех входов между двумя выходами с коэффициентом передачи минус 4,76 дБ и развязка между входами. Вариант делителя мощности  $3 \times 2$  отражен в скобках в названии предложенного делителя мощности и на рис. 1. Это относится и к другим делителям мощности, показанным на рис. 1–4.

На рис. 5 показаны расчетные характеристики предложенного делителя мощности.

Расчет проведен по программе Awe Design Environment для топологии делителя  $2 \times 3$  ( $3 \times 2$ ), показанного на рис. 4, б.

В С-диапазоне частот в 12-процентной полосе рабочих частот он обеспечивает получение следующих параметров:

- коэффициент передачи — от минус 5,5 до минус 4,8 дБ;

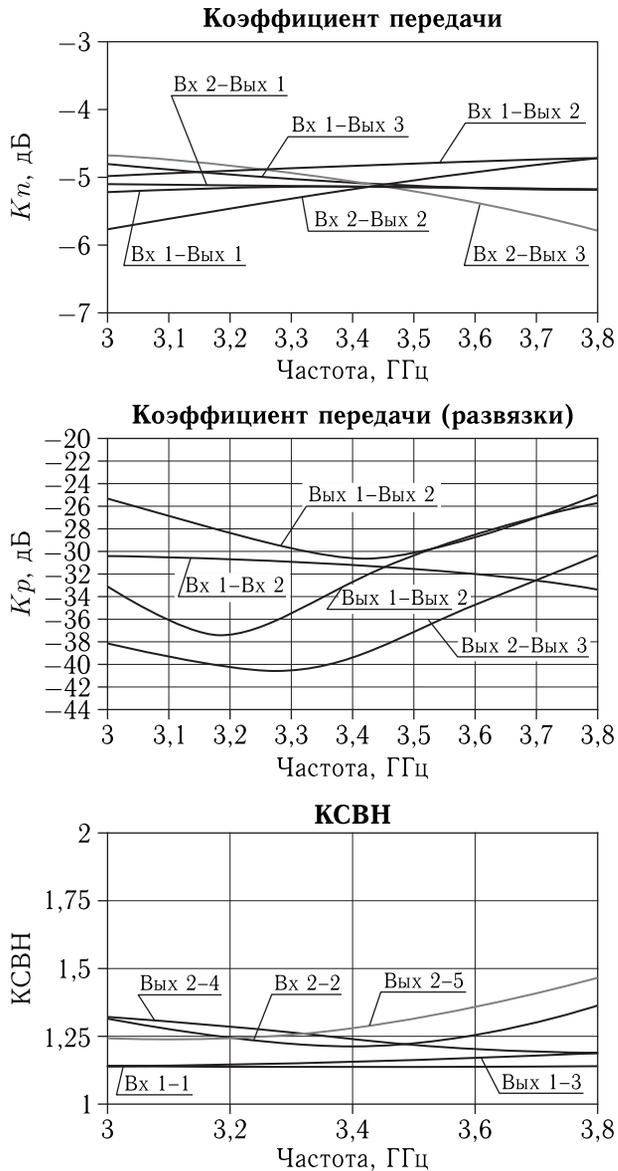


Рис. 5. Расчетные характеристики предлагаемого делителя мощности 2 × 3 (3 × 2)

- развязку между входами (выходами) — не менее 28 дБ;
- КСВН входов и выходов — не более 1,4.

### Заключение

Предложенное УПР 2 × 3 (3 × 2) обладает, по сравнению с аналогами, более простой конструкцией, меньшими габаритами и более высокой надежностью.

Представленное УПР в виде микрополоскового делителя 2 × 3 (3 × 2) может быть разработано для любого из диапазонов частот (S, C, X, Ku) с электрическими параметрами, массой и габаритами, а также с конструкцией, удовлетворяющей основным требованиям к УПР для БА КИС, и применяться для перспективных разработок БА КИС.

### Список литературы

1. Алыбин В. Г., Зарипин С. А., Якутин С. А. Микрополосковый делитель мощности с тремя входами и тремя выходами // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, вып. 1. С. 23–29.
2. Заявка на патент РФ № 2021104707 от 25.02.2021. Делитель мощности 2 × 3 (3 × 2) для бортовой аппаратуры космических аппаратов.
3. Lange Y. Interdigitated Stripline Quadrature Hybrid // IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques. 1969. Vol. MTT-17, № 12. P. 1150–1151.
4. Wilkinson E. An N-Way Hybrid Power Divider. IRF-Trans on Microwave Theory and Techniques. Vo C. MTT-8, No 1, January 1960. P. 116–118.