

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАВНЫХ СОГЛАСУЮЩИХ ПЕРЕХОДОВ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ УЧАСТКОВ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Панин Д.Н., Осипов О.В., Адамович Л.В.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ  
E-mail: pdntec@mail.ru*

Проведено экспериментальное исследование образцов плавных согласующих переходов на основе неоднородных участков микрополосковой линии передачи с различными профилями волновых сопротивлений. Проводятся сравнительные испытания макетных образцов плавных согласующих переходов с целью подтверждения теоретических данных, полученных методом оптимального параметрического синтеза. Доказана возможность применения синтезированного кусочно-линейного перехода для обеспечения хорошего согласования в достаточно широком диапазоне частот. Показано, что изготовленные неоднородные микрополосковые волноводные переходы обеспечивают согласование в диапазоне частот от 1,2 до 2,7 ГГц. Доказано, что использование двухступенчатых переходов позволяет в 1,5 раза увеличить частотную полосу согласования. Локально-оптимизированные согласующие переходы вблизи нижней границы рабочего диапазона частот могут дать существенный выигрыш в сравнении с согласующими переходами с экспоненциальным профилем волнового сопротивления при той же электрической длине. Разработанные согласующие переходы могут быть использованы при проектировании фильтров, согласующих трансформаторов, соединительных элементов линии передачи сверхвысоких частот.

**Ключевые слова:** согласующие переходы, неоднородные участки микрополосковой линии, профиль волнового сопротивления, фильтры, линии передачи сверхвысококачественного диапазона частот

Применение согласующих переходов (СП) является актуальным в системах космической и наземной связи в диапазонах очень- и ультра-высоких, а также сверхвысоких частот (СВЧ) в качестве компонентов широкополосных согласующе-симметрирующих устройств [1–4]. СП могут быть выполнены как в виде отдельных структурно-топологических единиц на печатной плате, так и входить в состав интегральных схем [5–7]. Интерес к таким переходам связан с тем, что на практике возникает необходимость соединения двух линий передачи, имеющих различные геометрические размеры. Такие переходы должны обеспечивать хорошее согласование как можно в более широком диапазоне частот.

Известно, что переходы с непрерывным изменением электрофизических параметров по сравнению со ступенчатыми переходами обеспечивают наименьшее отражение в широкой полосе частот при прочих равных условиях. Наиболее часто на практике применяются экспоненциальный, чебышевский и вероятностный переходы, последний из которых является предельным случаем ступенчатого перехода с максимально плоской характеристикой.

В данной статье проводятся сравнительные испытания макетных образцов плавных СП с целью подтверждения теоретических данных, полученных методом оптимального параметрического синтеза из [8–10]. Для проведения экспе-

римента изготовлены следующие макеты СП на основе микрополосковой линии передачи (МПЛ):

- 1) переход одноступенчатый СПО-50-5-1,  $f_0 = 1$  ГГц,  $\rho = 5$ ;
- 2) переход одноступенчатый СПО-50-10-1,  $f_0 = 1$  ГГц,  $\rho = 10$ ;
- 3) переход двухступенчатый СПД-50-10-1,  $f_0 = 1$  ГГц,  $\rho = 10$ ;
- 4) переход экспоненциальный СПЭ-50-5-1,  $f_0 = 1$  ГГц,  $\rho = 5$ ;
- 5) переход экспоненциальный СПЭ-50-10-1,  $f_0 = 1$  ГГц,  $\rho = 10$ .

Здесь  $f_0$  – частота, соответствующая нижней границе рабочего диапазона (частота среза);  $\rho = Z_{в1}/Z_{в2}$  – коэффициент трансформации по волновому сопротивлению;  $Z_{в1}$  и  $Z_{в2}$  – сопротивления входной и выходной линий передачи соответственно.

В качестве материала подложки СП использован ФЛАН-10, параметры которого представлены в таблице. Изготовленные СП имеют вход-

Таблица. Параметры материала подложки ФЛАН-10

Параметр	Значение
Диэлектрическая проницаемость	$10,0 \pm 0,5$
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,0015
Толщина материала, мм	$1,0 \pm 0,1$
Толщина фольги, мкм	35

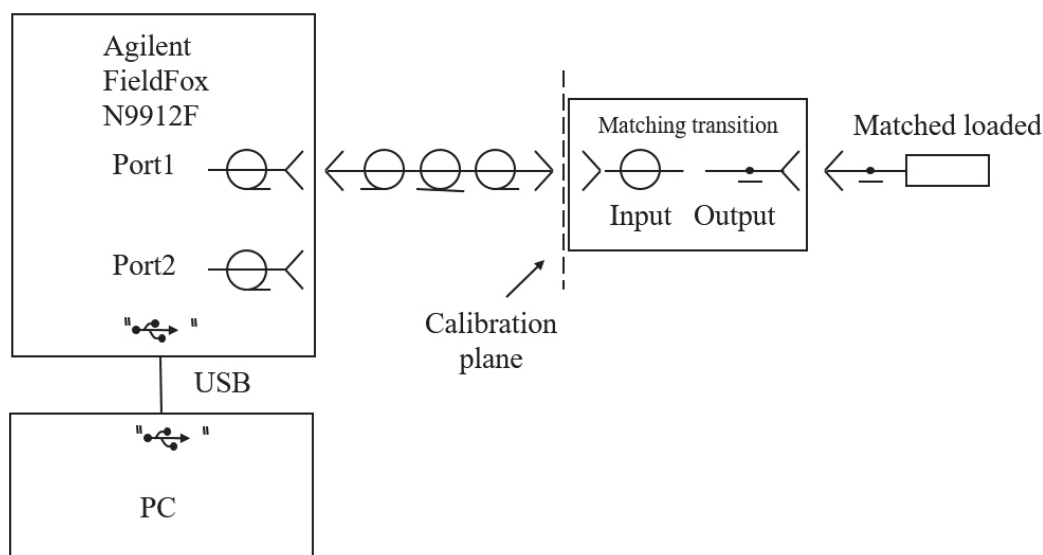


Рисунок 1. Схема измерения коэффициента стоячей волны по направлению

ной разъем типа SMA (розетка) S-2454 (ANLI) с волновым сопротивлением 50 Ом. Выход СП с волновым сопротивлением 5 или 10 Ом (в зависимости от типа) электрически соединен с согласованной нагрузкой-терминатором СН-5, либо СН-10 торцевого типа.

Нагрузки изготовлены на основе набора СВЧ-резисторов типа С6-6-1-0,5 с сопротивлением 50 Ом, соединенных параллельно по 10 шт. (СН-5) и 5 шт. (СН-10) соответственно. СП имеют защитное покрытие в виде паяльной маски толщиной не более 100 мкм. Для проведения эксперимента использовался измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения (векторный анализатор цепей) Agilent FieldFox N9912A (Agilent Technologies) в режиме измерения входных параметров (КСВН). Схема измерений приведена на рисунке 1.

Экспериментальные исследования макетных образцов СП сводились к измерению КСВН по входу в тракте 50 Ом при согласованном выходе 10 Ом (СН-10) для СПО-50-5-1, СПЭ-50-5-1 и при согласованном выходе 5 Ом (СН-5) для СПД-50-10-1, СПЭ-50-10-1. Фотографии разработанных макетных образцов представлены на рисунке 2 (СПО-50-10-1; СПО-50-5-1; СПД-50-10-1; СПЭ-50-10-1).

На рисунке 3, *a–г* приведены графики частотных зависимостей КСВН для макетных образцов согласующих переходов. Сплошными линиями на рисунке 3 показаны результаты экспериментальных измерений; штриховыми – результаты численного моделирования из [8–10]. Графики на рисунке 3 соответствуют следующим исследуемым образцам согласующих переходов:

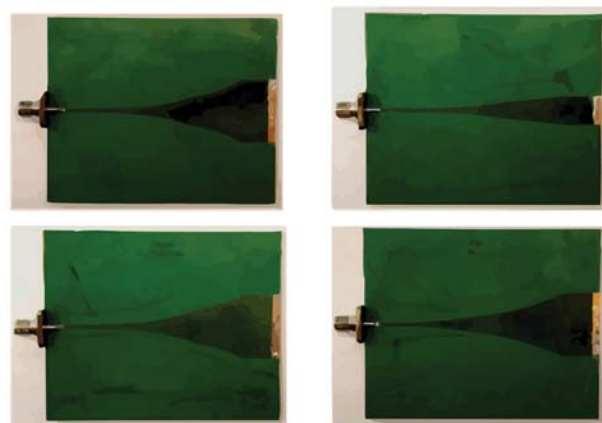
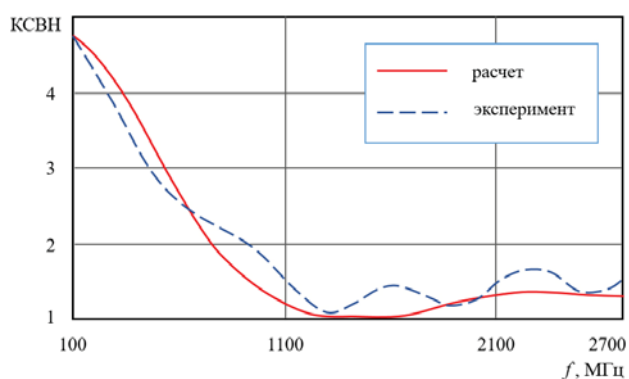


Рисунок 2. Фотографии макетных образцов согласующих переходов

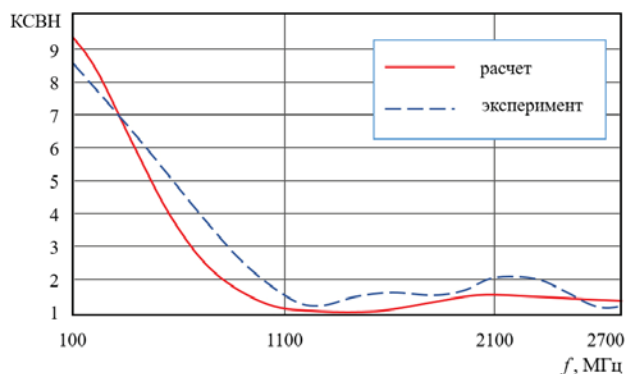
*a* – СПО-50-10-1; *b* – СПО-50-5-1; *c* – СПД-50-10-1; *d* – СПЭ-50-10-1.

Из графиков видно, что наблюдается хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных. На экспериментальных кривых в различной степени прослеживается тенденция наличия локального минимума в области, соответствующей области численной оптимизации, что также подтверждается данными, полученными ранее в ходе электродинамического моделирования. Также можно обратить внимание на увеличение рабочей полосы согласования для двухступенчатого перехода по сравнению с одноступенчатым.

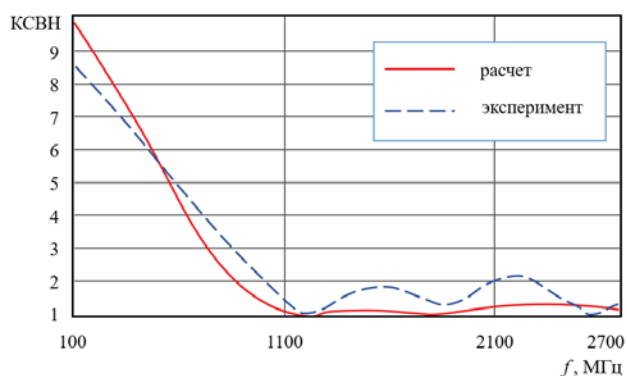
Из графиков, приведенных на рисунке 3, можно наблюдать также улучшение согласования в локальной области оптимизации для одноступенчатых и двухступенчатых СП по отношению к согласующим переходам с экспоненциальным профилем волнового сопротивления той же длины.



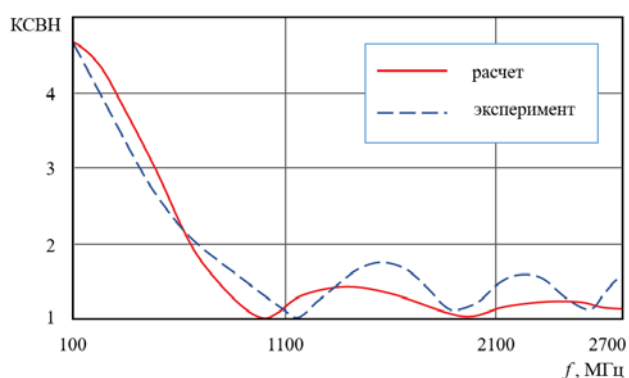
а



б



в



з

Рисунок 3. Частотные зависимости КСВН для различных образцов согласующих переходов: а – СПО-50-10-1; б – СПО-50-5-1; в – СПД-50-10-1; з – СПЭ-50-10-1

Это подтверждает актуальность разработки таких переходов для использования в качестве широкополосных согласующих устройств в элементах СВЧ-техники, в особенности когда имеются жесткие ограничения на габариты в сравнительно низкочастотных диапазонах – на метровых и дециметровых волнах. В этом случае локально-оптимизированные согласующие переходы вблизи нижней границы рабочего диапазона могут дать существенный выигрыш в сравнении с СП с экспоненциальным профилем волнового сопротивления при той же электрической длине.

Безусловно, будучи оптимальными характеристиками в некоторой локальной полосе частот, они дадут некоторый проигрыш по согласованию вне нее (выше по диапазону) по отношению к тому же СП с экспоненциальным профилем волнового сопротивления, что, однако, является в определенной мере ценой за оптимальное согласование. Впрочем, как показывают расчет и экспериментальные исследования, этот проигрыш является весьма несущественным.

Таким образом, в представленной работе проведено экспериментальное исследование макетных образцов согласующих переходов. Результаты эксперимента совпадают с расчетными данными, полученными в ходе решения задачи параметрического синтеза СП [8–10]. Показано, что изготовленные неоднородные полосковые волноводные переходы обеспечивают согласование в диапазоне частот от 1,2 до 2,7 ГГц. Доказано, что использование двухступенчатых переходов позволяет в 1,5 раза увеличить частотную полосу согласования. Результаты работы могут быть полезны при разработке устройств линий передач СВЧ-диапазона в авиационно-космической отрасли.

## Литература

1. Taghizadeh M., Moloudian Gh., Rouzbeh A.R. Design and simulation of band-pass filter using micro-strip lines // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2015. Vol. 4. № 11. P. 331–337.
2. Eom D.-S., Lee H.-Y. Substrate integrated waveguide transitions to planar transmission lines using lumped elements and their applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016. Vol. 64. № 12. P. 4352–4361.
3. Osman S., Oğuzhan K. Design and realization of different microstrip low pass filter topologies by aid of AWR Microwave Office iFilter wizard // Proc. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Turkey. 2015. P. 908–910.

4. Huang F. Microstrip band-pass filter with  $-67$  dB stop band up to 8.8 times the pass-band center frequency // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2017. Vol. 9. № 10. P. 1937–1944.
  5. Ragani T., Amar Touhami N., Agoutane M. Designing a microstrip coupled line bandpass filter // *International Journal of Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2. № 4. P. 266–269.
  6. Bogatykh N.A., Grachev G.G., Kaloshin V.A. An ultra-wideband feed based on a polygonal microstrip horn for planar multibeam antennas // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019. Vol. 64. № 1. P. 26–28.
  7. Design of broadband transition structure from microstrip to slotline with band notched characteristic / F.-K. Sun [et al.] // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018. Vol. 73. P. 105–112.
  8. Осипов О.В., Панин Д.Н., Никушин А.В. Метод оптимального параметрического синтеза широкополосных согласующих переходов // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. № 12. С. 50–56.
  9. Зайцев В.В., Панин Д.Н., Яровой Г.П. Компьютерный синтез плавных согласующих переходов // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2002. Т. 5. № 2. С. 59–61.
  10. Панин Д.Н., Зайцев В.В., Яровой Г.П. Метод синтеза плавных согласующих переходов // *Журнал радиоэлектроники*. 2001. № 11. С. 4.
- Получено 16.06.2020*

**Панин Дмитрий Николаевич**, к.ф.-м.н., доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой теоретических основ радиотехники и связи (ТОРС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). Тел. +7 846 228-00-72. E-mail: pdntec@mail.ru

**Осипов Олег Владимирович**, д.ф.-м.н., проректор по науке и инновациям, профессор кафедры радиоэлектронных систем ПГУТИ. Тел. +7 917 941-10-73. E-mail: o.osipov@psuti.ru

**Адамович Людмила Владимировна**, старший преподаватель кафедры ТОРС ПГУТИ. Тел. +7 846 228-00-72. E-mail: lva9@yandex.ru

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SMOOTH MATCHING TRANSITIONS BASED ON MICROSTRIP TRANSMISSION LINE HETEROGENEOUS SECTIONS

*Panin D.N., Osipov O.V., Adamovich L.V.*

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation  
E-mail: pdntec@mail.ru*

An experimental investigation of smooth matching transitions based on inhomogeneous sections of a microstrip transmission line with different wave impedances profiles was carried out in the present work. Comparative tests of smooth matching transitions prototypes are presented in order to confirm the theoretical data obtained by the optimal parametric synthesis method. The possibility of using synthesized piecewise linear transition to ensure good coordination in a fairly wide frequency range has been proven. It has been shown that fabricated inhomogeneous microstrip waveguide transitions provide matching in the frequency range from 1.2 to 2.7 GHz. It has been proven that the use of two-stage transitions allows a 1.5-times increase in the frequency matching band. Locally-optimized matching transitions near the lower boundary of the operating frequency range can give a significant gain in comparison with matching transitions with an exponential wave impedance profile for the same electrical length. The developed matching transitions can be used in the design of filters, matching transformers and connecting elements of the microwave frequencies transmission line.

**Keywords:** *matching transitions, microstrip line heterogeneous sections, wave impedance profile, filters, microwave frequencies transmission lines*

**DOI:** 10.18469/ikt.2020.18.3.13

**Panin Dmitry Nikolaevich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Acting Head of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communications Department, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor. Tel. +7 846 228-00-72. E-mail: pdntec@mail.ru

**Osipov Oleg Vladimirovich**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Vice-rector of Science and Innovation, Professor of Radioelectronic Systems Department, Doctor of Physics and Mathematics. Tel. +7 917 941-10-73. E-mail: o.osipov@psuti.ru

**Adamovich Lyudmila Vladimirovna**, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Senior Teacher of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communications Department. Tel. +7 846 228-00-72. E-mail: lva9@yandex.ru

### References

1. Taghizadeh M., Moloudian Gh., Rouzbeh A.R. Design and simulation of band-pass filter using micro-strip lines. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2015, vol. 4, no. 11, pp. 331–337.
2. Eom D.-S., Lee H.-Y. Substrate integrated waveguide transitions to planar transmission lines using lumped elements and their applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, vol. 64, no. 12, pp. 4352–4361.
3. Osman S., Oğuzhan K. Design and realization of different microstrip low pass filter topologies by aid of AWR Microwave Office iFilter wizard. *Proc. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Turkey, 2015, pp. 908–910.
4. Huang F. Microstrip band-pass filter with –67 dB stop band up to 8.8 times the pass-band center frequency. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2017, vol. 9, no. 10, pp. 1937–1944.
5. Ragani T., Touhami N., Agoutane M. Designing a microstrip coupled line bandpass filter. *International Journal of Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 266–269.
6. Bogatykh N.A., Grachev G.G., Kaloshin V.A. An ultra-wideband feed based on a polygonal microstrip horn for planar multibeam antennas. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 26–28.
7. Sun F.-K. et al. Design of broadband transition structure from microstrip to slotline with band notched characteristic. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2018, vol. 73, pp. 105–112.
8. Osipov O.V., Panin D.N., Nikushin A.V. Optimal parametric synthesis method for broadband matching junctions. *Pis'ma v ZhTF*, 2013, vol. 39, pp. 50–56. (In Russian.)
9. Zajtsev V.V., Panin D.N., Jarovoj G.P. Computer synthesis of smooth matching transitions. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2002, vol. 5, no. 2, pp. 59–61. (In Russian.)
10. Panin D.N., Zajtsev V.V., Jarovoj G.P. Method of synthesis of smooth matching transitions. *Zhurnal radioelektroniki*, 2001, no. 11, p. 4. (In Russian.)

Received 16.06.2020