

УДК 621.372.21

## КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ КОПЛАНАРНОЙ ЛИНИИ\*

А. С. ЧЕРНОВ, И. П. ГОЛУБЕВА, В. А. КАЗМИРЕНКО, Ю. В. ПРОКОПЕНКО

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
Украина, Киев, 03056, пр-т Победы, 37*

**Аннотация.** Представлен анализ комплексной эффективной диэлектрической проницаемости и характеристического сопротивления микромеханически перестраиваемой копланарной линии. Перестройка параметров копланарной линии обеспечивается за счет перемещения сигнального электрода линии над подложкой или диэлектрической пластины над поверхностью электродов линии. В результате такого перемещения в линии происходит реконфигурация электромагнитного поля сложного характера, которая описана в терминах эффективной диэлектрической проницаемости и характеристического сопротивления. Исследовано влияние физических и геометрических параметров линии на характеристики перестройки эффективной диэлектрической проницаемости и изменение характеристического сопротивления и потерь в линии. Установлено, что перестройка параметров линии предложенным способом позволяет получить высокую чувствительность эффективных параметров к перемещениям, при этом уровень потерь в линии не увеличивается, а при определенных условиях уменьшается. Полученные результаты дают возможность проектировать высокочастотные перестраиваемые резонансные элементы и фазовращатели на основе микромеханически управляемой копланарной линии.

**Ключевые слова:** копланарная линия; эффективная диэлектрическая проницаемость; характеристическое сопротивление; микромеханическая перестройка; потери в диэлектрике; потери в металле

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные телекоммуникационные и радиотехнические устройства предусматривают возможность оперативной перестройки рабочей частоты [1], в том числе для обеспечения электромагнитной совместимости с другими системами, а также в связи с оперативным изменением использования радиочастотного ре-

сурса [2]. Снижение электромагнитной интерференции между работающими радиотехническими системами также достигается путем применения антенн с избирательной диаграммой направленности [3].

Во многих практических сценариях применения таких систем подразумевается оперативная перестройка диаграммы направленно-

---

\* Предварительные материалы данной статьи представлены на конференции ELNANO-2020 (Киев, 2020): A. Chernov, I. Golubeva, V. Kazmirenko, Y. Prokopenko, "Losses in the micromechanically tunable coplanar waveguide based line," Proc. of 2020 IEEE 40th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology, ELNANO, 22-24 April 2020, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2020. DOI: [10.1109/ELNANO50318.2020.9088764](https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088764).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Y. Yamao and N. Akutsu, "SHF-band 3-bit reconfigurable BPF employing pHEMT switch arrays for 5G multiband operation," in *Proc. of European Microwave Conf. in Central Europe, EuMCE 2019*, 2019, pp. 298-301, uri: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8874847>.
2. J. Zhu, C. Jia, C. Wang, and K. Li, "An adaptive spectrum allocation algorithm in ultra-dense network," in *2018 10th Int. Conf. on Communication Software and Networks, ICCSN 2018*, 2018, pp. 433-437, doi: [10.1109/ICCSN.2018.8488267](https://doi.org/10.1109/ICCSN.2018.8488267).
3. M. Kamran Khattak, S. Kahng, M. Salman Khattak, A. Rehman, C. Lee, and D. Han, "Low profile, wideband and high gain beamsteering antenna for 5G mobile communication," in *2017 IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp., Proceedings*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 2575-2576, doi: [10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073330](https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073330).
4. F. C. Chen, R. S. Li, and J. P. Chen, "A tunable dual-band bandpass-to-bandstop filter using p-i-n diodes and varactors," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 46058-46065, 2018, doi: [10.1109/ACCESS.2018.2862887](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862887).
5. A. M. E. Safwat, F. Podevin, P. Ferrari, and A. Vilcot, "Tunable bandstop defected ground structure resonator using reconfigurable dumbbell-shaped coplanar

waveguide,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 9, pp. 3559-3564, 2006, doi: [10.1109/TMTT.2006.880654](https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.880654).

6. A. K. Horestani, Z. Shaterian, J. Naqui, F. Martin, and C. Fumeaux, “Reconfigurable and tunable S-shaped split-ring resonators and application in band-notched UWB antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 9, pp. 3766-3776, 2016, doi: [10.1109/TAP.2016.2585183](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2585183).

7. P. Jinde, S. M. Rathod, A. D. Chaudhari, and A. Jeyakumar, “Optically controlled circular microstrip antenna using photoconductive switch,” in *2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section Int. Conf. on Electrical, Computer and Electronics, UPCON 2017*, 2017, vol. 2018-Janua, pp. 340-344, doi: [10.1109/UPCON.2017.8251071](https://doi.org/10.1109/UPCON.2017.8251071).

8. H. V. Nguyen and A. Sharaiha, “Design of miniaturized and tunable antenna by integrating BST thin film varactor,” in *Int. Conf. on Advanced Technologies for Communications*, 2018, vol. 2018-Octob, pp. 65-68, doi: [10.1109/ATC.2018.8587467](https://doi.org/10.1109/ATC.2018.8587467).

9. A. F. Azarnaminy and R. Mansour, “A combline tunable filter with loss compensation circuit,” in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, 2018, vol. 2018-June, pp. 1367-1369, doi: [10.1109/MWSYM.2018.8439360](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2018.8439360).

10. D. Mercier *et al.*, “X band distributed phase shifter based on sol-gel BCTZ varactors,” in *European Microwave Week 2017: “A Prime Year for a Prime Event”, EuMW 2017 - Conf. Proc.; 47th European Microwave Conference, EuMC 2017*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 1230-1233, doi: [10.23919/EuMC.2017.8231072](https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231072).

11 A. S. Abdellatif *et al.*, “Low loss, wideband, and compact cpw-based phase shifter for millimeter-wave applications,” *IEEE Trans. Microw.*

*Theory Tech.*, vol. 62, no. 12, pp. 3403-3413, 2014, doi: [10.1109/TMTT.2014.2365539](https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2365539).

12. Y. Poplavko *et al.*, “Low loss microwave piezo-tunable devices,” in *Proc. of the 36th European Microwave Conf., EuMC 2006*, 2006, pp. 657-660, doi: [10.1109/EUMC.2006.281496](https://doi.org/10.1109/EUMC.2006.281496).

13. T. W. Lin, K. K. Wei Low, R. Gaddi, and G. M. Rebeiz, “High-linearity 5.3-7.0 GHz 3-pole tunable bandpass filter using commercial RF MEMS capacitors,” in *2018 48th European Microwave Conf., EuMC 2018*, 2018, pp. 555-558, doi: [10.23919/EuMC.2018.8541669](https://doi.org/10.23919/EuMC.2018.8541669).

14. R. Garg, I. Bahl, and M. Bozzi, *Microstrip Lines and Slotlines*, 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, Inc., 2013, doi: [10.1017/CBO9781107415324.004](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004).

15. Е.А.Цыба, И.П.Голубева, В.А.Казмиренко, and Ю.В.Прокопенко, “Комплексная эффективная диэлектрическая проницаемость микромеханически перестраиваемых микрополосковых линий,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, vol. 61, no. 2, pp. 96-107, 2018, doi: [10.20535/s0021347018020048](https://doi.org/10.20535/s0021347018020048).

16. A. S. Chernov, I. P. Golubeva, V. A. Kazmirenko, and Y. V. Prokopenko, “Tunable coplanar waveguide,” *Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 23, no. 6, pp. 13-21, 2018, doi: [10.20535/2523-4455.2018.23.6.154565](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.6.154565).

17. A. Chernov, I. Golubeva, V. Kazmirenko, and Y. Prokopenko, “Losses in the micromechanically tunable coplanar waveguide based line,” in *2020 IEEE 40th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology*, 2020, pp. 355-360, doi: [10.1109/elnano50318.2020.9088764](https://doi.org/10.1109/elnano50318.2020.9088764).

18. Ю.М.Поплавко, *Физика диэлектриков*. Киев: Вища школа, 1980.

19. А.И.Ахиезер and И.А.Ахиезер, *Электромагнетизм и электромагнитные волны*. Москва: Высшая школа, 1985.

20. А.Д.Григорьев, *Электродинамика и техника СВЧ*. Москва: Высшая школа, 1990.

Поступила в редакцию 29.04.2020

После доработки 13.06.2020

Принята к публикации 12.07.2020