

REFERENCES

1. Varyukhin A. S., Zhiryakov V. D., Popov O. V., Selin D. N., Chernoles V. P. Vertikal'nyi koaksial'nyi vibrator [Vertical coaxial vibrator]. Pat. RF, no. 2101810 C1. IPC H01Q9. Publ. 10.01.1998.
2. Dvurechensky V. D., Vinnitsa Z. L., Fedotov A. Y. Antenna s krugovoi diagrammoi napravlenosti v azi-mutal'noi ploskosti [Antenna omnidirectional in azimuth] Pat. RF, no. 2177661 C1. IPC H01Q11/02. Publ. 27.12.2001.
3. Wi-Fi routery [routers]. Available at: <http://www.tp-link.ru/products/list-9.html> (accessed 18 September 2016).
4. D-Link. Available at: <http://www.dlink.ru/r/products/2/461.html> (accessed 18 September 2016).
5. ANSYS HFSS. Available at: <https://www.cadfeem-cis.ru/products/ansys/electronics/hfss> (accessed 12 January 2017).
6. Sugak M., Ballandovich S., Terentjeva P., Kostikov G. Development and Experimental Investigation of Smart Antennas for Unmanned Aerial Vehicles. Proc. of the 2016 IEEE NW Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. Saint Petersburg, Febr. 2–3, 2016, SPb, SPbLETI publ, pp. 486–489.

Received October, 24, 2016

For citation: Kostikov G. A. Terentyeva P. V. Antenna Array with Switchable Radiation Pattern for Mobile Communications Systems. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 1, pp. 29–35. (In Russian)

Grigori A. Kostikov – Ph.D. in engineering (2007), Associate Professor of the department of Theoretical Basics of Radio Engineering of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: technical electrodynamics; antenna-feeder devices.

E-mail: gakostikov@gmail.com

Polina V. Terentyeva – 2nd year Master's Degree student of the Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", member of the Department of Radio Equipment Systems of the university member of the Research Institute for Radio Equipment and Telecommunications (Saint-Petersburg). The author of 15 scientific publications. Area of expertise: antenna-feeder devices.

E-mail: teterevinsky.pol@gmail.com

УДК 621.371

А. Д. Григорьев, Б. О. Джалилов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Сравнение методов электрической перестройки антенн для сотовых телефонов

Описаны методы электрической перестройки рабочего диапазона частот антенны для мобильных телефонов, работающих в нескольких диапазонах частот LTE. Предложена антенна типа PIFA, содержащая высокочастотные и низкочастотные ветви. Элементы перестройки частоты подключены к низкочастотной ветви. Предложенная антенна работает на одной из четырех низкочастотных полос в зависимости от состояния переключающего элемента, сохраняя при этом настройку в диапазоне высоких частот. В качестве переключателя использованы переменный цифровой конденсатор, варактор и $p-i-n$ -диод. Сравнение результатов моделирования показало, что диод обеспечивает наилучшую производительность, имея КПД 36...60 % в низкочастотных диапазонах и 78 % в высокочастотном диапазоне. Компьютерное моделирование антенны проведено с помощью программы RFS.

Антенна, переменный конденсатор, варактор, $p-i-n$ -диод, компьютерное моделирование

Конструкторы антенных систем для современных мобильных телефонов сотовой связи столкнулись с серьезными техническими проблемами, поскольку антенна, с одной стороны, должна быть многофункциональной и эффективной, а с другой –

иметь небольшие размеры и быть технологичной. Антенны сотового телефона также должны поддерживать несколько стандартов беспроводной связи, включая GSM 850/900 и DCS/PCS/WCDMA, а также стандарт LTE, который в последнее время широко

применяется в системах мобильной связи четвертого поколения, так как обеспечивает более высокую пропускную способность системы и максимальную скорость передачи данных.

В табл. 1 приведены несколько диапазонов частот, часто используемых в стандартных системах LTE. Как правило, телефон работает одновременно в низкочастотных (НЧ) и высокочастот-

Таблица 1

Название диапазона	Центральная частота, МГц	Диапазон частот, МГц
B17	725.0	704...746
B13	766.5	746...787
B20	826.5	791...862
B5-B8	892.0	824...960
B7	2595.0	2500...2690

ных (ВЧ) диапазонах. Создать широкополосную малогабаритную антенну, эффективно работающую во всех указанных диапазонах, невозможно. Использование нескольких антенн, настроенных на различные диапазоны, неэффективно из-за отсутствия свободного места в телефоне. Более эффективно применять перестраиваемую антенну, которую можно с успехом использовать в системах мобильной связи. Ее характеристики могут быть приспособлены для достижения селективности по частоте, по ширине полосы, а также поляризации и коэффициенту усиления. Это приводит к значительному сокращению общего размера многополосных систем беспроводной связи.

Для перестройки рабочей частоты антенны можно использовать переменные цифровые конденсаторы (ПЦК), варакторные диоды (ВД), $p-i-n$ -диоды или микроэлектромеханические системы.

В антенне [1] использован копланарный волновод, нагруженный переключатель конденсаторов, выполненный по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Однако высокие значения управляющего тока, необходимость малых размеров антенны и сложность изготовления делают этот метод малоприменимым для рассматриваемого применения.

Два прототипа антенны на базе КМОП- и МЭМС-технологий с различными размерами рассматриваются и сравниваются в [2]. Для перестройки антенны были также использованы ПЦК. Результаты показали, что антенна с ПЦК работает с большей эффективностью, чем антенна с МЭМС-переключателем. К сожалению, полоса пропускания в обоих случаях является довольно узкой.

Антенна, перестраиваемая варактором в диапазоне 1.9...2.1 ГГц, также описана в работе [2]. Однако эта антенна не совместима со стандартом LTE.

В работе [3] рассмотрена PIFA-антенна, перестраиваемая с использованием $p-i-n$ -диода. Антенна может быть настроена на разные диапазоны частот переключением диода. Когда $p-i-n$ -диод находится в выключенном состоянии, антенна настроена на полосу НЧ. Если $p-i-n$ -диод включен, антенна настраивается на полосы USPCS и WiMAX. Описанная антенна имеет сравнительно большой размер, что ограничивает ее использование в современных мобильных телефонах.

В настоящей статье описана сконструированная авторами электрически перестраиваемая антенна типа PIFA, содержащая две ветви, одна из которых настроена на ВЧ-диапазон В7, а другая – на НЧ-диапазоны В5...В20 (рис. 1). Антенна содержит металлизированное основание 1; ВЧ-ветвь 2 и НЧ-ветвь 3, между которыми включена развязывающая LC-цепь 6 и элемент перестройки частоты 7. Порт, согласующие цепи и элемент перестройки расположены на плате (носителе) из FR4 8, а сама антенна – на внутренней поверхности крышки телефона. Антенна возбуждается источником напряжения (портом) 4 через согласующую LC-цепь 5. Печатная плата имеет размеры обычного мобильного телефона. Элемент перестройки частоты подключен к НЧ-ветви. Расстояние от заземленного конца антенны до элемента перестройки оптимизировалось с помощью программы RFS.

Для перестройки резонансной частоты антенны использовались ПЦК типа PE2304 фирмы "Peregrine Semiconductors" [4] (эквивалентная схема приведена на рис. 2, а), варактор типа SMV2022 фирмы "Skyworks" [5] (эквивалентная схема – рис. 2, б) и 2 $p-i-n$ -диода типа HSMP4820 фирмы "Hawlett Packard" [6] (эквивалентные схемы: в открытом состоянии – рис. 2, в, в закрытом – рис. 2, г). Значения параметров эквивалентных схем приведены в табл. 2, 3 и 4 соответственно. Параметр s определяет состояние ПЦК и принимает значения 0...31.

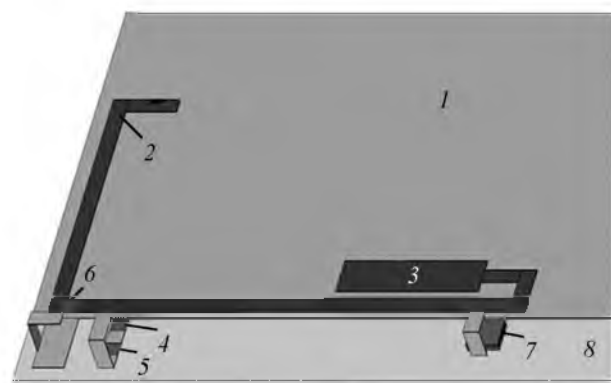


Рис. 1

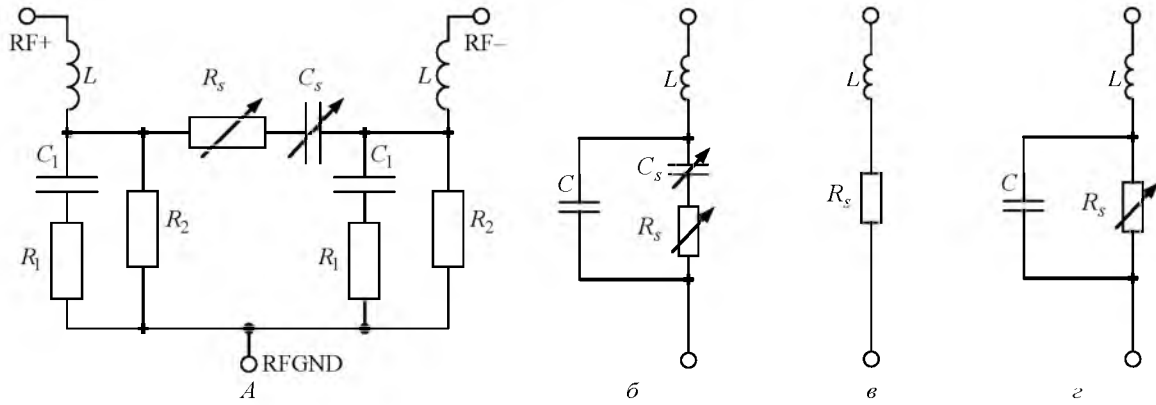


Рис. 2

Таблица 2

Параметр	Значение	Параметр	Значение
C_s , пФ	$0.129s + 0.6$	R_2 , кОм	10.00
R_s , Ом	$\frac{20}{s + 20/(s + 0.7)} + 0.7$	C_1 , пФ	0.50
R_1 , Ом	7.00	L , нГн	0.27

Таблица 3

Параметр	Значение	Параметр	Значение
L , нГн	1.5	$C_s(u)$, пФ	0.73...7.5
C , пФ	0.17	$R_s(u)$, Ом	2.1...5.5

Таблица 4

Параметр	Состояние $p-i-n$ -диода	
	Открытое	Закрытое
	Значение	
L , нГн	0.75	0.75
C_s , пФ	–	0.8
R_s , кОм	0.6	2500

На рис. 3, *a–в* показаны частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на зажимах порта при управлении с помощью ПЦК, варактора и $p-i-n$ -диода соответственно. Как видно, с помощью всех указанных элементов перестройки можно достичь переключения между частотами 724, 775, 827, 892 МГц, что соответствует заданным LTE-диапазонам. Положение ВЧ-полосы при такой перестройке практически не меняется. КСВН в НЧ- и ВЧ-диапазонах не превосходит 3.

При использовании ПЦК указанные резонансные частоты достигаются при значениях параметра $s = 29, 16, 7$ и 2 (рис. 3, *a*). Ширина полосы в НЧ-диапазонах составляет 7.8...10.6%, а в ВЧ-диапазоне – 9.2%.

Перестройка антенны с помощью варактора достигается изменением подаваемого на него запирающего напряжения в интервале $-8.5...-1$ В, что соответствует изменению емкости от 5 до 1.35 пФ (рис. 3, *б*, табл. 3). Необходимая перестройка в НЧ-диапазоне сопровождается небольшим смещением настройки в ВЧ-диапазоне. Полоса пропускания в НЧ-диапазонах достигает 11.6%, в ВЧ-диапазоне – 8.9%.

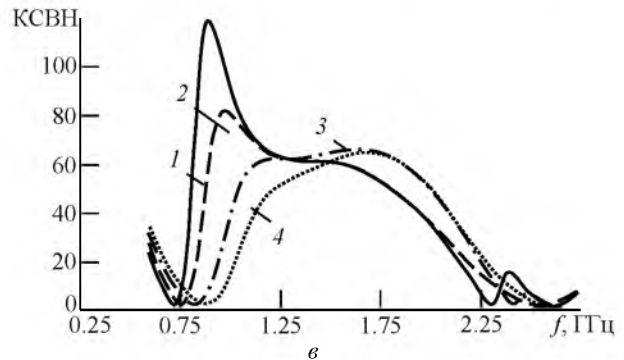
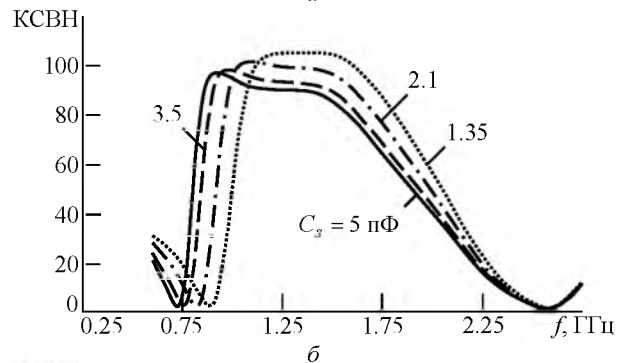
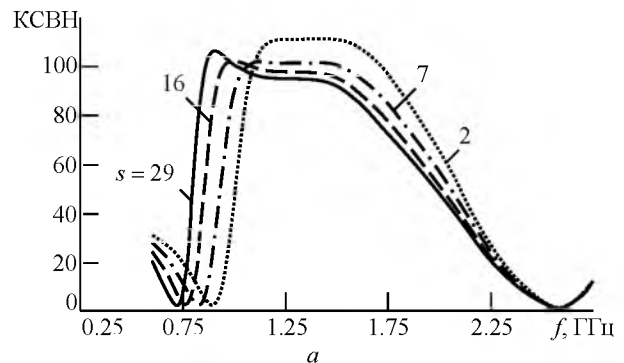


Рис. 3

Для переключения между необходимыми НЧ-диапазонами могут быть использованы также 2 $p-i-n$ -диода, включенных последовательно с конденсаторами емкостью 11 пФ (первый диод) и 15 пФ (второй диод) (рис. 3, *в*). В открытом состоянии $p-i-n$ -диод имеет низкое сопротивление 0.6 Ом при токе 10 мА. В закрытом – высокое сопротивление и необходимую емкость (табл. 4). Состояние диодов при

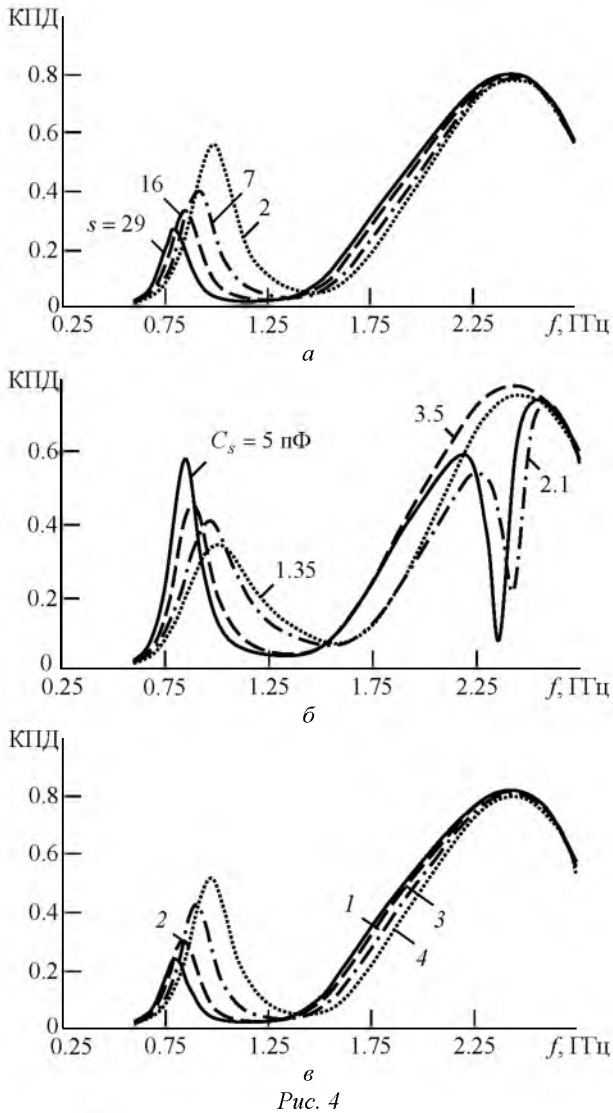


Рис. 4

настройках, соответствующих кривым на рис. 3, в, отражено в табл. 5. Ширина полосы в НЧ-диапазонах составляет 12–19,4 %, в ВЧ-диапазоне – 12,2 %, что соответствует стандарту LTE.

На рис. 4 приведены зависимости радиационного КПД антенны от частоты. Радиационный КПД антенны с использованием ПЦК составляет в НЧ-диапазонах 27–56 %, в ВЧ-диапазоне достигает 80 % (рис. 4, а). При использовании варактора эти значения составляют 20–57 % и 80 % соответственно (рис. 4, б). Наилучшие результаты получены в схеме с *p-i-n*-диодами: КПД антенны увеличивается с ростом частоты от 36–60 % в области НЧ до 78 % на ВЧ (рис. 4, в, состояние диодов для отдельных кривых соответствует табл. 5).

Таблица 5

Кривая (рис. 3, в)	Состояние диодов	
	Диод 1	Диод 2
1	Открыт	Открыт
2	Закрыт	Открыт
3	Открыт	Закрыт
4	Закрыт	Закрыт

Сравнение описанных способов перестройки показывает, что наилучшие результаты по КПД достигаются с помощью схемы управления на *p-i-n*-диодах, однако ее недостатком является большое потребление тока диодами в открытом состоянии (10 мА) при малом напряжении (0,4 В). Такое сочетание параметров требует отдельного источника питания, хотя и достаточно малой мощности. В связи с этим схема с варактором представляется более перспективной, так как обеспечивает требуемую ширину полосы пропускания во всех диапазонах при несколько меньших значениях КПД. Использование более совершенных типов варакторов (например, с гетеропереходами) позволит увеличить КПД антенны, доведя его до уровня схемы с *p-i-n*-диодами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna Using RF MEMS Technology / E. Erdil, K. Topalli, M. Unlu, O. A. Civi, T. Akin // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2007. Vol. 55, iss. 4. P. 1193–1196.
2. Multiband Frequency Reconfigurable 4G Handset Antenna with MIMO Capability / J. Ilvonen, R. Valkonen, J. Holopainen, V. Viikari // Progress In Electromagnetics Research. 2014. Vol. 148. P. 233–243.
3. A Reconfigurable PIFA Using a Switchable PIN-Diode and Fine-Tuning Varactor for USPCS/WCDMS/m-WiMAX/ WLAN / J. H. Lim, G. T. Black, Y. I. Ko, C. W. Song,

- T. Y. Yun // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2010. Vol. 58, iss. 7. P. 2404–2411.
4. URL: <http://www.psemi.com/products/digitally-tunable-capacitors-dtc> (дата обращения: 15.01.2017).
5. URL: <http://www.skyworksinc.com/Product/571/SMV2022-004LF> (дата обращения: 15.01.2017).
6. URL: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-1395EN> (дата обращения: 15.01.2017).
7. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Моделирование антенн сотовых телефонов методом векторных конечных элементов // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, вып. 3. С. 261–270.

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2016 г.

Для цитирования: Григорьев А. Д., Джалилов Б. О. Сравнение методов электрической перестройки антенн для сотовых телефонов // Изв. вузов России. Радиотехника. 2017. № 1. С. 35–39.

Григорьев Андрей Дмитриевич – доктор технических наук (1985), профессор (1989) кафедры радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ, в том числе двух учебников и двух монографий. Сфера научных интересов – электроника и техника СВЧ; вычислительная электродинамика.

E-mail: adgrigoriev@eltech.ru

Джалилов Бахромжон Одилжонович – магистр по направлению "Электроника и микроэлектроника" (2013), аспирант кафедры радиотехнической электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Область научных интересов – техника СВЧ; телекоммуникационная техника.

E-mail: bahrom3909@mail.ru

A. D. Grigoriev, B. Djalilov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Comparison of Antennas Electrical Tuning Methods for Mobile Applications

Abstract. The various methods of antenna electrical tuning for mobile handsets working in several LTE frequency bands are described. The PIFA-type antenna containing high and low frequency branches is proposed. A tuning element is connected to the low-frequency branch. The proposed antenna operates at one of four low-frequency bands depending on the tuning element switching states, keeping tuning to the high-frequency band. A digitally tunable capacitor, a varactor and a *p-i-n*-diode are used as a tuning element. Comparison of simulation results demonstrates that the *p-i-n* diode provides the best performance showing antenna radiation efficiency 36...60 % in the low frequency bands and 78 % in the high frequency band. The antenna simulation is performed by RFS computer code.

Key words: Antenna, Variable Capacitor, Varactor, *p-i-n*-Diode, Computer Simulation

REFERENCES

1. Erdil E., Topalli K., Unlu M., Civi O. A., Akin T. Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna Using RF MEMS Technology. IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2007, vol. 55, no. 4, pp. 1193–1196.
2. Ilvonen J., Valkonen R., Holopainen J., Viikari V. Multiband Frequency Reconfigurable 4G Handset Antenna with MIMO Capability. Progress In Electromagnetics Research. 2014, vol. 148, pp. 233–243.
3. Lim J. H., Black G. T., Ko Y. I., Song C. W., Yun T. Y. A Reconfigurable PIFA Using a Switchable PIN-Diode and Fine-Tuning Varactor for USPCS/WCDMS/m-WiMAX/ WLAN. IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2010, vol. 58, no. 7, pp. 2404–2411.
4. Available at: <http://www.psemi.com/products/digitally-tunable-capacitors-dtc> (accessed 15 January 2017).
5. Available at: <http://www.skyworksinc.com/Product/571/SMV2022-004LF> (accessed 15 January 2017).
6. Available at: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-1395EN> (accessed 15 January 2017).
7. Grigoriev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Simulation cell phone antennas by vector finite element. *Radiotekhnika i elektronika*. 2012, vol. 57, no. 3, pp. 261–270. (In Russian)

Received November, 8, 2016

For citation: Grigoriev A. D., Djalilov B. Comparison of Antennas Electrical Tuning Methods for Mobile Applications. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*. [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 1, pp. 35–39. (In Russian)

Andrey D. Grigoriev – D.Sc. in engineering (1985), Professor (1989) of the department of Radio Engineering Electronics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics and microwave equipment; computing electrodynamics.

E-mail: adgrigoriev@eltech.ru

Bakhromjon Djalilov – Master's Degree in electronics and microelectronics (2013), the post-graduate student of the department of Radio Engineering Electronics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of one scientific publication. Area of expertise: UHF technology; telecommunication technology.

E-mail: bahrom3909@mail.ru