

**Ошурков Н.Ю., Тургалиев В.М.**  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

## Разработка двухдиапазонной СВЧ ректенны

*Представлены результаты разработки двухдиапазонной СВЧ ректенны, состоящей из широкополосной антенны, диплексера и двух выпрямителей, согласованных на разных частотах. Разработана, изготовлена и экспериментально исследована широкополосная монополярная антенна на печатной плате, согласованная по уровню коэффициента отражения -10 дБ в полосе частот 1.78 - 2.7 ГГц. Для разделения сигналов, одновременно принятых антенной используется диплексер на LC-резонаторах с центральными частотами 1.8 и 2.4 ГГц. Схема выпрямителя разработана на диодах Шоттки BAT15-099 с использованием нелинейного анализа, что позволило получить КПД до 62% при мощности СВЧ сигналов в 1 мВт.*

**Ключевые слова:** СВЧ, ректенна, монополярная антенна, выпрямитель, диплексер.

Нас окружают множество источников электромагнитного поля, такие как: радио, телевидение, сотовая связь, беспроводные сети Wi-Fi и т.п. Ректенна способна принимать энергию электромагнитных волн и преобразовывать ее в постоянный ток, который может быть использован для питания беспроводных датчиков или других электронных устройств. Принимаемая мощность сигнала в любой беспроводной системе СВЧ диапазона, описывается основным уравнением радиолокаций (1):

$$P_R = P_T * \frac{G_T * G_R * \lambda^2}{(4 * \pi * d)^2 * L}, \quad (1)$$

где  $P_R$  – принятая мощность,  $P_T$  – мощность передачи,  $G_T$  – коэффициент усиления передающей антенны,  $G_R$  – коэффициент усиления приемной антенны,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $d$  – расстояние между передающей и приемной антенной,  $L$  – коэффициент потерь в тракте.

Существует несколько способов повысить выходную мощность ректенны: увеличить эффективность выпрямителей [1]; увеличить число антенн (создать антенную решетку) [2]; применение ректенн работающих в нескольких диапазонах частот [3,4].

Работа посвящена разработке двухдиапазонной ректенны с центральными частотами 1.8 ГГц и 2.4 ГГц, данные диапазоны частот являются активно используемыми в телекоммуникационных системах, таких как GSM 1800, Bluetooth и Wi-Fi, создавая ощутимую напряженность электромагнитного поля для ее вторичного использования. На рисунке 1 показана структурная схема двухполосной ректенны, состоящей из широкополосной монополярной антенны, которая принимает радиосигналы, далее для разделения двухчастотного сигнала на два выпрямителя, согласованных каждый в своем диапазоне частот, используется диплексер, а выпрямленное напряжение постоянного тока суммируется на нагрузке.

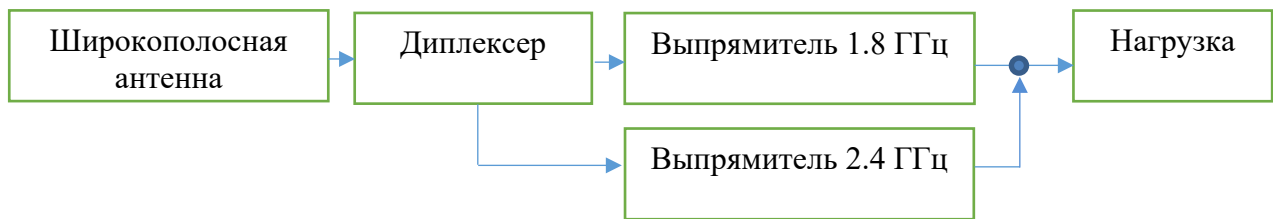


Рис. 1. Структурная схема двухдиапазонной СВЧ ректенны.

Антенна должна обеспечивать прием радиоволн в диапазоне частот от 1.8 ГГц до 2.4 ГГц. Наиболее простым вариантом реализации широкополосной антенны является монополь, выполненный в виде металлического диска на печатной плате. Данный тип антенны имеет широкую полосу частот и диаграмму которая не имеет выраженной направленности. Модель с указанием основных размеров и прототип разработанной антенны, реализованный на печатной плате FR-4 толщиной 0,5 мм представлены на рис. 2.

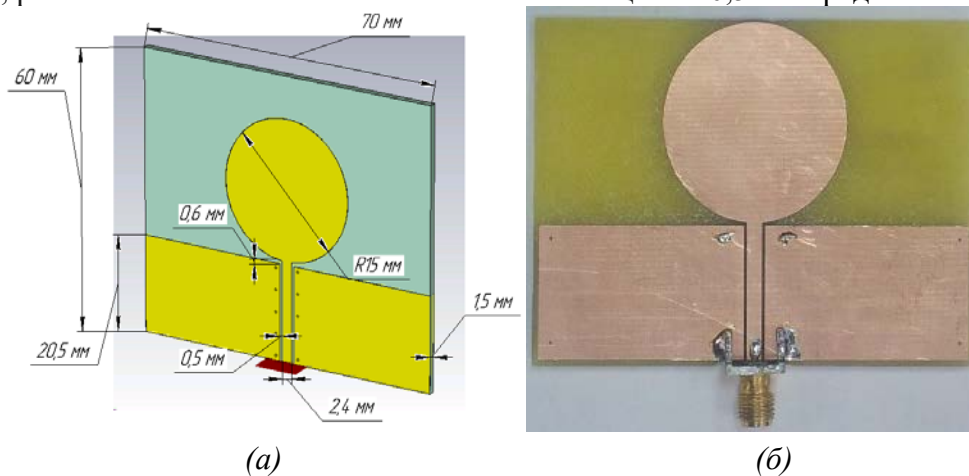


Рис.2. Модель монопольной антенны (а); прототип (б).

Результаты измерения коэффициента отражения антенн достаточно хорошо совпадают с результатами электродинамического моделирования, что можно видеть на рисунке 3. Диаграммы направленности для частот 1.8ГГц и 2.4ГГц для Н- и Е -плоскости представлены на рис. 4.

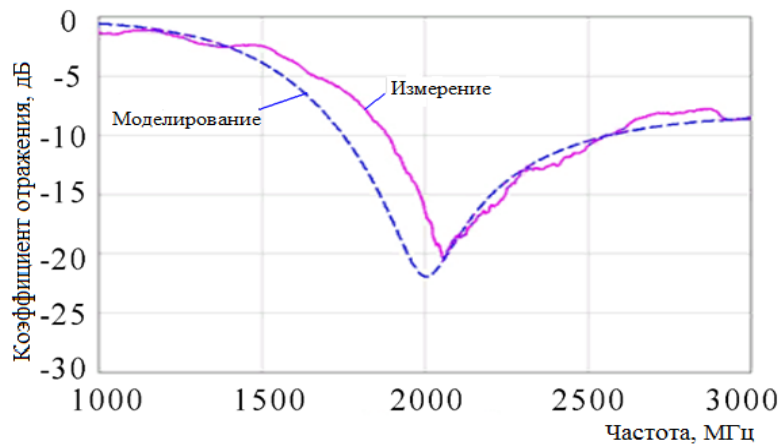


Рис.3. Частотная зависимость коэффициента отражения антенны.

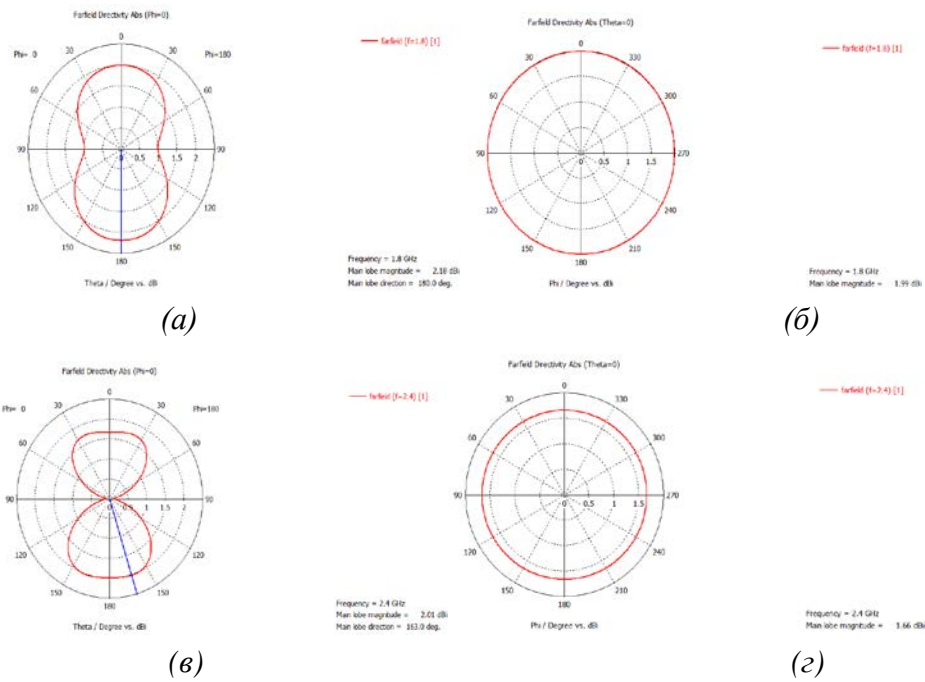


Рис.4. Диаграммы направленности для частот 1.8ГГц: Н-плоскость (а); Е -плоскость (б); для 2.4ГГц: Н-плоскость (в); Е -плоскость (г).

Изготовленная антенна была подключена к анализатору спектра для оценки уровня принимаемых сигналов. На рисунке 5 показан спектр принимаемых сигналов, в котором можно выделить следующие телекоммуникационные сети: 1.8 ГГц - GSM1800, 2.1 ГГц - LTE, 2.4 ГГц - Bluetooth, 2.5-2.6 ГГц - Wi-Fi. Наибольшее измеренное значение мощности на частоте 1,8 ГГц составляет -30 дБм, что соответствует 1 мкВт.

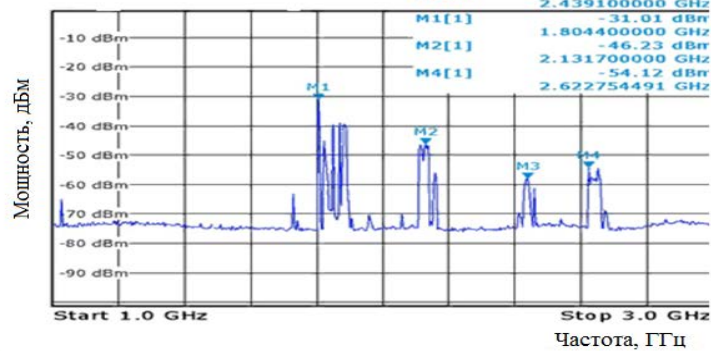


Рис. 5. Спектр сигналов принимаемых разработанной антенной.

Для разделения одновременно принятых антенной сигналах на частотах 1.8 и 2.4 ГГц разработан диплексер на сосредоточенных LC-контурах, электрическая схема и частотные характеристики которого показаны на рис. 6 (а, б). На частоте 1.8 ГГц вся мощность поступает из порта 1 в порт 2, а на частоте 2.4 ГГц мощность передается из порта 1 в порт 3.

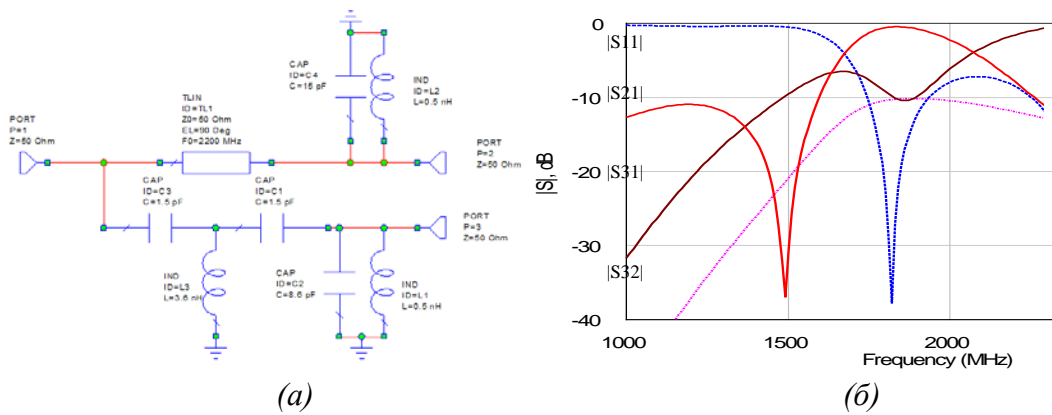


Рис. 6 - Диплексер: схема (а), частотные характеристики (б).

При выборе схемы выпрямителя были рассмотрены несколько стандартных типов схем: однополупериодный, двухполупериодный, мостовой, выпрямитель с удвоением напряжения и умножитель напряжения Кокрофта-Уолтона. По совокупности критериев: наибольшей полосы частот и наибольшего КПД была выбрана схема однополупериодного выпрямителя (рисунок 7 а).

В качестве диода Шоттки среди коммерчески доступных образцов был выбран BAT15-099, так как он имеет минимальное прямое напряжение  $U_{пр}=0.41$  В для открытия диода и емкость перехода  $S_{пер}=0.35$  пФ, обеспечивающая его эффективную работу на СВЧ. Характеристики выпрямителя с увеличением частоты ухудшаются, поэтому дальнейшие расчеты характеристик выпрямителя приведены для наибольшей из частот - 2,4 ГГц.

Диод Шоттки является нелинейным элементом и его параметры зависят от мощности сигнала. Поэтому при моделировании выпрямителя необходимо учитывать нелинейные характеристики диода. Нелинейные S-параметры в зависимости от мощности входного сигнала для выбранной схемы выпрямителя, согласованного на частоте 2.4ГГц, показана на рисунке 7 б.

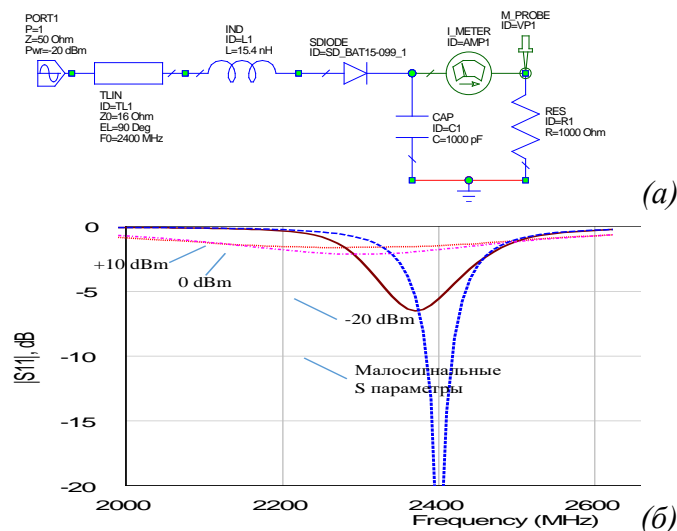


Рис. 7 - Схема однополупериодного выпрямителя с цепями согласования(а); коэффициент отражения на входе выпрямителя при разном уровне мощности (б).

При увеличении входной мощности до 0 дБм коэффициент отражения значительно ухудшается, следовательно, ухудшается и эффективность преобразования. Необходимо оптимизировать согласующую цепь под требуемый уровень входной мощности.

Коэффициент отражения после оптимизации согласующей цепи (рисунок 8 а) при уровне входной мощности 1 мВт представлен на рисунке 8 б.

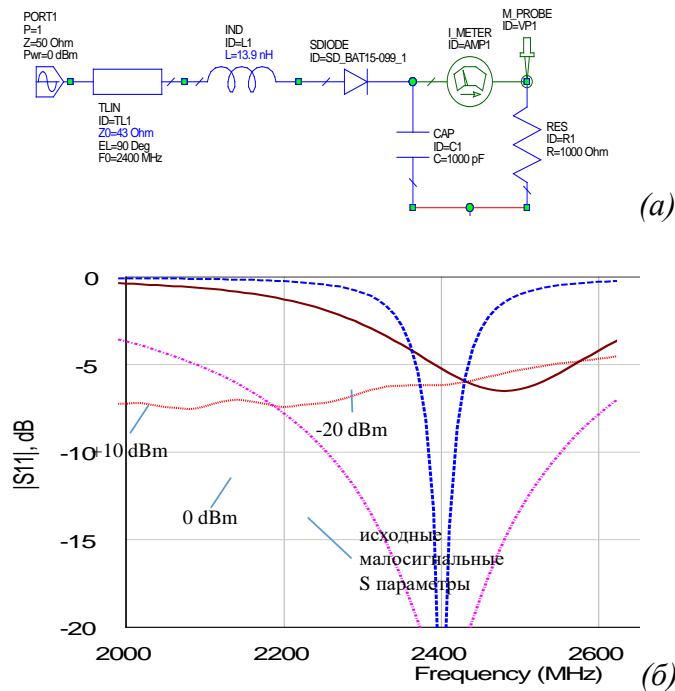


Рис. 8 - Схема однополупериодного выпрямителя после оптимизации (а); зависимость коэффициента отражения на входе выпрямителя при разном уровне мощности (б).

Значения выходной мощности от нагрузки для схем выпрямителя, согласованного на 2.4 ГГц при малом сигнале и при уровне сигнала 1 мВт представлены в таблице 1.

Таблица 1

Рвх	Rн, Ом	Исходная схема		Оптимизированная	
		Рвых, мВт	КПД, %	Рвых, мВт	КПД, %
1 мВт	250	0,047	4,7	0,313	31
	500	0,091	9	0,484	48
	1000	0,174	17	0,62	62

КПД оптимизированной схемы выпрямителя на диоде Шотки ВАТ15-099 достигает 62 % при нагрузке 1кОм и входной мощности 1 мВт.

Дальнейшее развитие данной работы планируется в направлении создания антенной решетки из разработанных монопольных антенн, что позволит повысить выходную мощность системы. Однако решетка будет сильно направленной, что может сказаться на эффективности при одновременном приеме в двух диапазонах от разных источников, что потребует поиска оптимального положения решетки для обеспечения максимальной выходной мощности.

#### Библиографический список

1. Shabnam L., Ajay B.G., Ke Wu. A High-Efficiency 24 GHz Rectenna Development Towards Millimeter // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 2014. Vol. 61.
2. Huang W., Zhang B. Study on an s-band rectenna array for wireless microwave power transmission //Progress in Electromagnetics Research. 2013. Vol. 135.P. 747–758.
3. Kuhn V., Lahuec C., Seguin F., Person C. A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester with RF-to-DC Efficiency up to 84%// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 63.
4. Collado A., and Georgiadis A. Conformal hybrid solar and electromagnetic (EM) energy harvesting rectenna // IEEE Trans. Circuit Syst. Reg. Papers. 2013. Vol. 60. No. 8. P. 2225–2234.