

Гибкие антенны и импедансные поверхности для беспроводных систем на поверхности человеческого тела

Обсуждаются результаты разработки элементов гибких носимых беспроводных систем для различных применений (медицина, пожаротушение, военные применения и др.). Гибкие беспроводные технологии требуют применения низкопрофильных, легких и компактных антенн, устойчивых к изгибу. Для уменьшения влияния биологического объекта (человеческого тела) на параметры носимых антенн их располагают над отражающими высокоимпедансными поверхностями, которые также должны быть устойчивыми к изгибу. Приводятся примеры реализации гибких антенн над искусственными гибкими импедансными поверхностями.

Ключевые слова: беспроводная система, гибкая система, антенна, импедансная поверхность

Разработка гибких носимых беспроводных систем обусловлена необходимостью их применения в широком спектре приложений, таких как медицина, пожаротушение, военные применения и др. [1]. Их малый вес, низкая стоимость изготовления с использованием недорогих гибких подложек (пластик, бумага, текстиль) делают гибкую электронику весьма привлекательной. Новое направление технологии телекоммуникационных систем связывают с новым типом беспроводных сетей, расположенных на человеческом теле (Wireless Body Area Network, WBAN). Такие системы в сочетании с персональными сетями беспроводной связи обеспечивают мониторинг состояния биологических систем в режиме реального времени. Эффективность систем в значительной мере зависит от характеристик антенн, интегрированных в систему. Гибкие беспроводные технологии требуют применения низкопрофильных, легких и компактных антенн, которые должны быть механически прочными, устойчивыми к изгибу и, в то же время, обеспечивать требуемые диаграммы направленности излучения и соответствующие характеристики.

Гибкие антенны. Гибкие (конформные) антенны выполняются таким же образом, как и плоские антенны с заменой жестких плоских подложек на гибкие (Рисунок 1). На рисунке представлены фотографии гибкой антенны на полиамидной пленке (слева) и на бумажной основе (справа). Большинство исследований представлено результатами моделирования и экспериментальных исследований диаграмм направленности и входного сопротивления, полученных для различных типов, изогнутых и мятых гибких антенн.

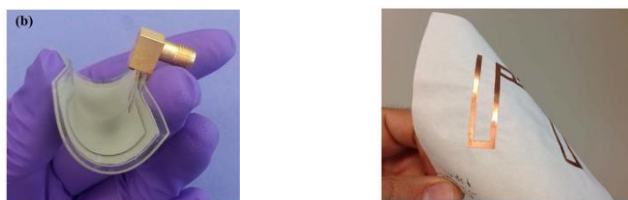


Рисунок 1

Для разработки гибких антенн используются разнообразные диэлектрические материалы, такие как каптоновая полиамидная пленка, полимерные и углерод-эпоксидные композиты, текстильные ткани, бумага и другие. Для антенных применений выбирается коммерчески доступная бумага толщиной порядка 0,25 мм с гидрофобным покрытием. Диэлектрические параметры бумаги в частотном диапазоне 0,4-1,5 ГГц: $\epsilon_r = 3,2$, $\text{tg}\delta = 0,06$ [2].

Полимерные материалы для гибких антенн характеризуются параметрами $\epsilon_r = 2-3,3$ и $\text{tg}\delta = 0,003-0,005$ в частотном диапазоне 0,4-2,5 ГГц.

В качестве носимых весьма популярны текстильные антенны. Используются различные ткани и материалы (Табл. 1, [2]), на которые наносится проводящий слой. Разработаны различные так называемые электротекстили (E-Textile) [3]: Zelt и Flectron на основе нейлоновой ткани, покрытой оловом/медью или только медью; Shieldit и Taffeta на полиэфирных тканях с покрытием никелем и медью, и адгезионным слоем на другой стороне подложки. На рисунке 2 представлены фотографии патч-антенн, изготовленных из этих материалов, и измеренные коэффициенты отражения по сравнению с обычной жесткой патч-антенной на фольгированном диэлектрике (красная линия).

Таблица 1

Материал	Толщина (мм)	ϵ_r	$\text{tg}\delta$
Фетр	3,2	1,36	0,016
Шерсть (овечья)	2	1,2	0,004
Шелк	1,56	1,2	0.054
Хлопок	0,44	1,54	0,058

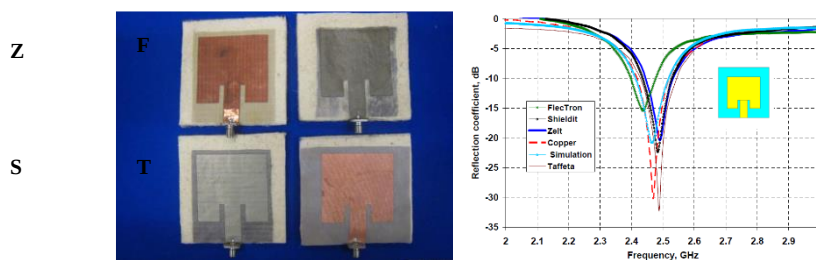


Рисунок 2

Антенна, изготовленная из материала с высокой проводимостью по технологии трафаретной печати серебряных нанопроволок (AgNW – Ag nanowires), полученных на поверхности эластомерной подложки (полидиметилсилоксан), может работать в условиях растяжения и обратимой деформации [4]. Резонансная частота антенны зависит от напряжения при растяжении. На рис. 3 показан внешний вид антенны и график изменения резонансной частоты при линейном растяжении от 0% до 15%.

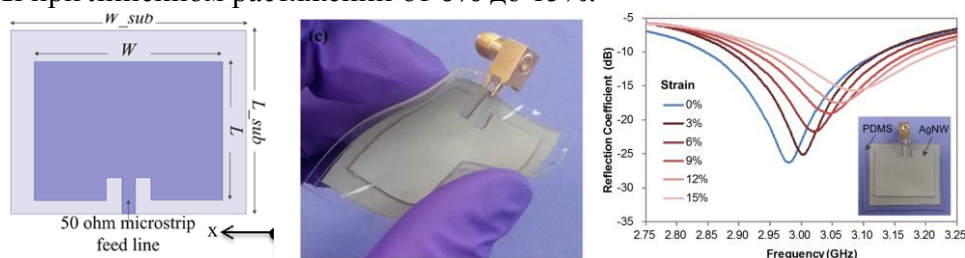


Рисунок 3.

Излучатели выполняются также из текстильных проводов, сформированных из непрерывных волокон [3]). Исследовались различные материалы для волокон: тонкие медные провода с диаметром 0,06 мм, текстильные провода, сделанные из волокон серебра, никель-медного сплава, стальных волокон и однородных полиамидных посеребрённых волокон.

Широкое применение находят вышитые антенны на бумаге или текстильной ткани, используемые на одежде людей, вовлеченных в систему мониторинга [5, 6]. Для вышивки

используются различные «нити»: выпускаемые коммерчески Amberstrand, состоящие из полимерных волокон, покрытых слоем серебра; MCEY, состоящие из медных нитей, покрытых серебром, встроенных в диэлектрик (полиэстер) и др. Вышитый диполь на ткани для военного обмундирования и многопетлевой диполь на джинсовой ткани показаны на рис. 4 слева. Здесь же приведены коэффициенты отражения для диполя, выполненного из различных нитей, и многопетлевого диполя, размещенного на одежде, для разного положения рук (в стороны, вниз, вверх). Антенны остаются работоспособными в пределах некоторого ограниченного диапазона частот.

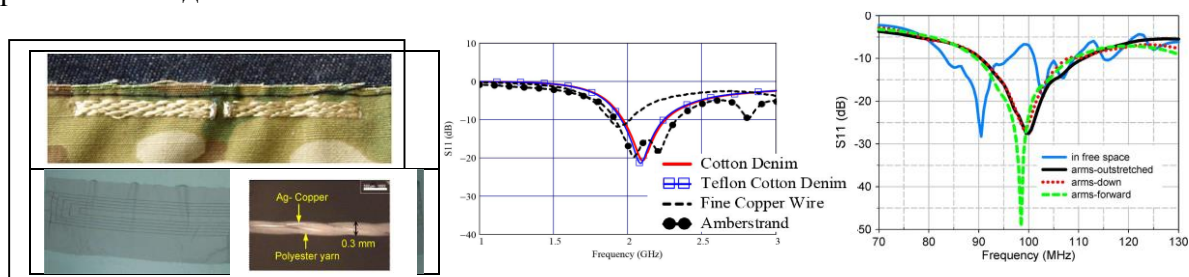


Рисунок 4

Гибкие антенны могут формироваться путем применения струйной печати на ткани или бумаге [7]. Для носимых антенн весьма привлекательной является применение технологии волновода, интегрированного в подложку [8].

Носимые антенны находятся в непосредственной близости от человеческого тела, которое влияет на параметры антенны. Влияние тела может быть ослаблено с помощью экранирующих структур. Для этой цели применяют искусственные структуры со свойствами идеальной магнитной стенки. Интеграция этих искусственных экранирующих систем с антеннами является чрезвычайно полезной в случае носимых антенн [9]. Искусственная магнитная стенка может быть выполнена в виде высокоимпедансной поверхности (ВИМП), которые успешно применяются во многих антенных системах для повышения эффективности. Их преимущества проявляются в подавлении поверхностной волны и уменьшении взаимной связи между излучающими элементами антенных решеток. В носимых антеннах, расположенных над ВИМП, удастся значительно уменьшить нежелательное проникновение ЭМ волны в человеческое тело, а также уменьшить рассогласование.

ВИМП ведет себя как идеальный магнитный проводник в определенном частотном диапазоне и обеспечивает 0° фазы коэффициента отражения для электрического поля при нормальном падении плоской волны. Структуры ВИМП являются искусственными и, как правило, реализуется в виде периодических металлизированных печатных структурных элементов на диэлектрической подложке. Элементы могут быть также выполнены в виде прорезей в металлизированном слое. В качестве элементов используются Иерусалимский крест, «собачья косточка», структуры 2 LC и др. Антенны работают в ограниченной частотной полосе порядка 7-18%, определяемой по заданному уровню коэффициента отражения (-10 дБ).

Детальный анализ диполя над импедансной (частотно-избирательной) поверхностью выполнен в [10]. Антенна содержит три металлизированных слоя, содержащих планарный диполь, ВИМП на периодической структуре элементов «собачья косточка» и металлизированный экран (рис. 5). Металлизированные слои разделены слоем диэлектрика RT 5880 толщиной 1,575 мм. В качестве антенны используется петлевой диполь. Применение ВИМП позволяет использовать низкопрофильную антенну, расположенную на малом

расстоянии от экрана, и улучшить все характеристики антенны, по сравнению со случаем использования обычного металлического экрана. На рис. 5 представлена фотография и характеристики разработанной антенны с ВИМП: коэффициент отражения в полосе частот и диаграмма направленности в Е-плоскости. Максимальный коэффициент усиления на частоте 5,6 ГГц в Е-плоскости составил 5,3 дБи.

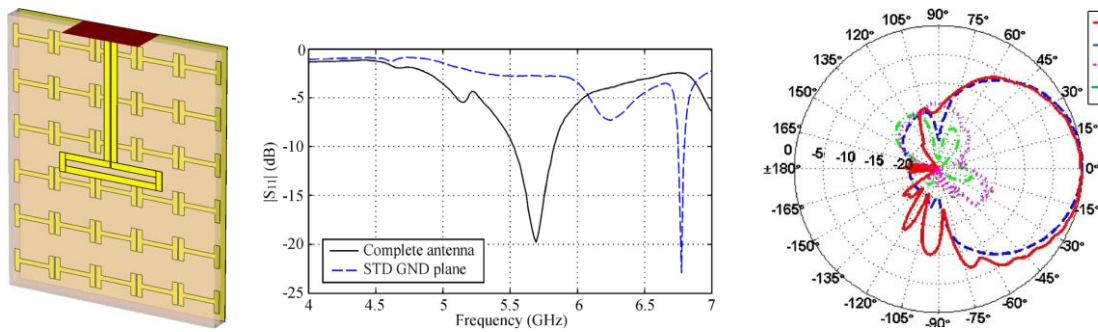


Рисунок 5

Для разработки гибких низкопрофильных антенн с ВИМП необходимо использовать гибкие импедансные поверхности, для которых используются те же материалы и технологии, которые применяются для гибких антенн. На рис. 6. приведены

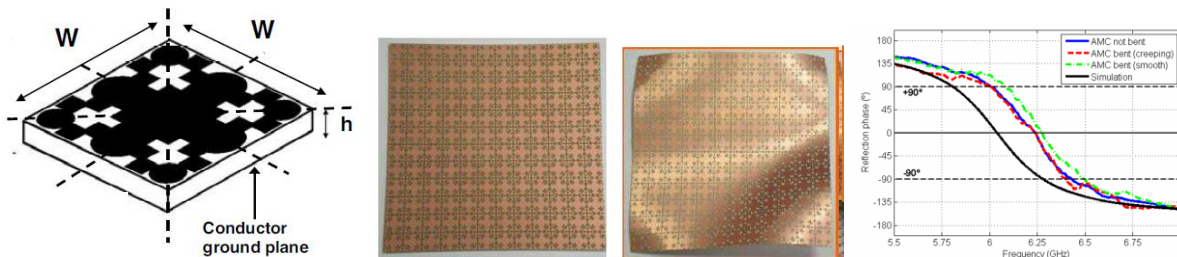


Рисунок 6

конфигурация планарного структурного элемента, фотографии недеформированной и смятой ВИМП, а также частотные зависимости коэффициента отражения для плоской и смятой структуры [11]. Другие варианты гибких ВИМП анализируются в [12-14]. Структура, фотография и частотные зависимости фазы коэффициента отражения Е-компоненты ЭМ волны для ВИМП [12] приведены на рис. 7.

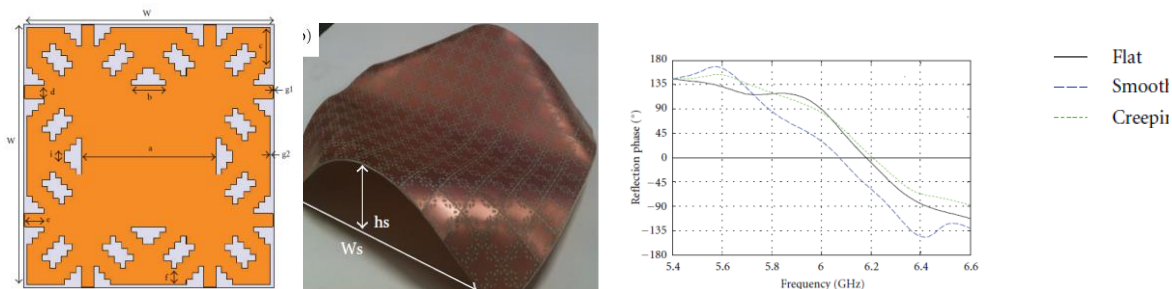


Рисунок 7

Фазовые характеристики коэффициента отражения для Е-компоненты ЭМ волны гибких ВИМП на патч-элементах и элементах типа «собачья косточка» исследовались в [13, 14]. Результаты приведены на рис. 8: ВИМП на элементах типа «собачья косточка» позволяют использовать их на цилиндрических поверхностях весьма малого радиуса в условиях

существенного изгиба. При этом частота, на которой наблюдается нулевое значение фазы коэффициента отражения, соответствующее свойствам идеальной магнитной стенки, не испытывает возмущения.

Большое число исследований гибких ВИМП в сочетании с исследованиями гибких антенн позволяют решить задачу их интегрирования и практического применения.

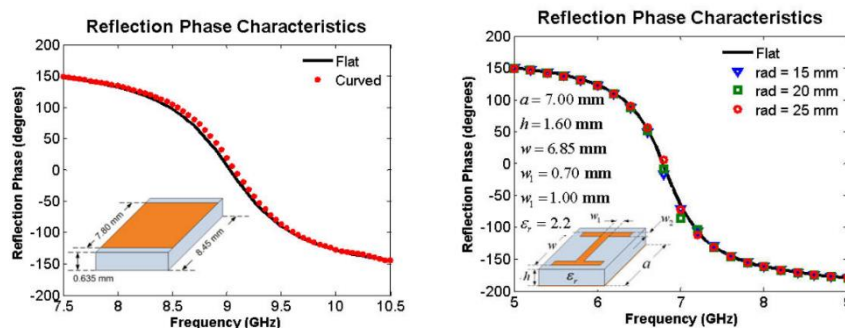


Рисунок 8

Гибкие компактные антенны, интегрированные с ВИМП, предназначенные для применения в телемедицине, детально исследовались в [15]. Печатный монополю (М-антенна, рис.9), возбуждаемый с помощью копланарного волновода, изготовлен на подложке из каптона толщиной 58 мкм. Антенна, работающая на частоте 2,45 ГГц, интегрированная с планарной ВИМП на элементах типа модифицированный Иерусалимский крест со щелевыми прорезями. ВИМП выполняется на той же подложке с обратной стороны, что позволяет получить тонкий гибкий элемент. На рис. 9 приведена фотография гибкой антенны с ВИМП, которая размещена на диэлектрическом цилиндре, и изображение руки фантома с такой антенной. Здесь же представлены экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения от антенны на цилиндрическом фантоме для двух значений радиуса (13 мм и 27 мм). По уровню 10-12 дБ для коэффициента отражения параметры антенны при изгибе сохраняются.

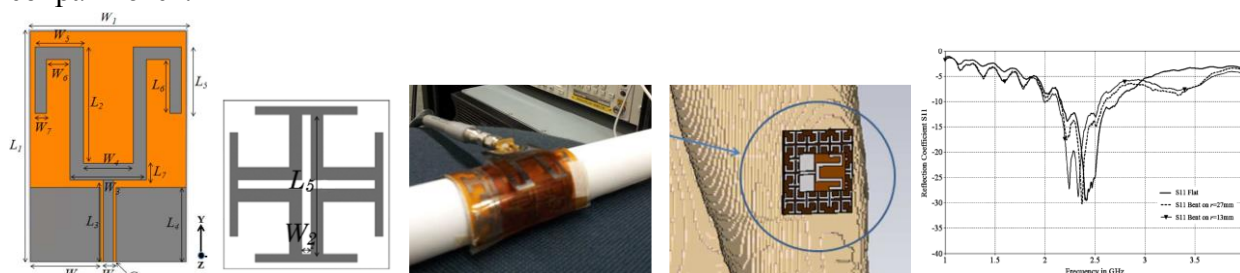


Рисунок 9

Чрезвычайно важными являются результаты исследования удельного коэффициента поглощения (SAR) при использовании предложенной антенны. На рис. 10 представлены результаты моделирования распределения SAR по поверхности предложенной структуры (слева) по сравнению с результатами для такого же монополя без ВИМП. Оценка дает значения SAR для монополя 1,88 Вт/кг и для интегрированной структуры 0,683 Вт/кг, что соответствует уменьшению SAR за счет применения ВИМП на 64%.

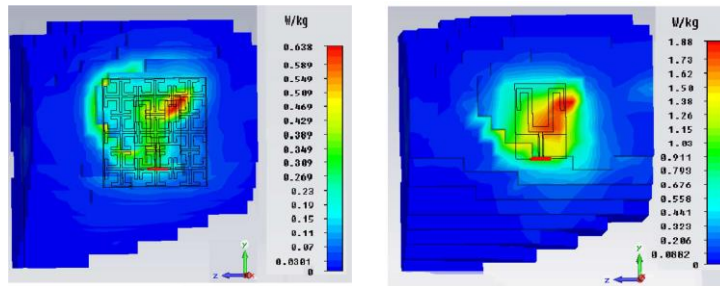


Рисунок 10

Приведенный обзор демонстрирует успехи в разработке гибких антенн, в том числе, интегрированных с ВИМП, для различных применений: в медицине, системах мониторинга и др.

Библиографический список

1. Hall P. S. Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications / P. S. Hall and Y. Hao - Artech House, Second Edition - 2012.
2. Zhu S. Dual-Band Wearable Textile Antenna on an EBG Substrate / S. Zhu, R. Langley // - IEEE Trans. on Antennas and Propagation - 2009. - Vol. 57. - № 4, pp. 926-935.
3. Kennedy T. F. Body-Worn E-Textile Antennas: The Good, the Low-Mass, and the Conformal / T. F. Kennedy, P. W. Fink, A. W. Chu, N. J. Champagne, G. Y. Lin, and M. A. Khayat // - IEEE Trans. on Antennas and Propagation - 2009. - Vol. 57. - № 4, pp. 910-918.
4. Song L. Stretchable and Reversibly Deformable Radio Frequency Antennas Based on Silver Nanowires / L. Song, A. C. Myers, J. J. Adams, and Y. Zhu. ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2014 - 6, pp. 4248–4253.
5. Tsois A. Embroidery and Related Manufacturing Techniques for Wearable Antennas: Challenges and Opportunities / Aris Tsois, William G. Whittow, Antonis A. Alexandridis, and J. (Yiannis) C. Vardaxoglou // Electronics. – 2014 - 3, pp. 314-338; doi:10.3390/electronics3020314.
6. Roh Jung-Sim. Embroidered Wearable Multiresonant Folded Dipole Antenna for FM Reception, / Jung-Sim Roh, Yong-Seung Chi, Jae-Hee Lee, Youndo Tak, Sangwook Nam, and Tae Jin Kang // IEEE Trans. on Antennas and Wireless Propagation Letters – 2010. - Vol. 9, pp. 803-806.
7. Yang L. RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate Using Inkjet-Printing Technology / L. Yang, A. Rida, R. Vyas, M. M. Tentzeris // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques - 2007. - Vol. 55. - No. 12, Part 2, pp.2894 – 2901.
8. Agneessens S. Compact Half Diamond Dual-Band Textile HMSIW On-Body Antenna / Sam Agneessens, and Hendrik Rogier // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2014. - Vol. 62. - No. 5, pp. 2374-2381.
9. Shahid Bashir. Design and Synthesis of Non Uniform High Impedance Surface based Wearable Antennas / A Doctoral Thesis, Loughborough University, October 2009.
10. Vallecchi A. Low Profile Fully Planar Folded Dipole Antenna on a High Impedance Surface / Andrea Vallecchi, Javier R. De Luis, Filippo Capolino, and Franco De Flaviis // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. - 2012. - Vol. 60. - No. 1, pp. 51-62.
11. de Cos M. E. Flexible Uniplanar Artificial Magnetic Conductor / M. E. de Cos, Y. Alvarez, R. Hadarig, and F. Las-Heras // Progress In Electromagnetics Research. – 2010. - Vol. 106, pp. 349-362.
12. de Cos M. E. Novel Flexible Artificial Magnetic Conductor / M. E. de Cos and F. Las-Heras // Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Antennas and Propagation. – 2012. - Article ID 353821, 7 pages, doi:10.1155/2012/353821.
13. Ahmet Cemal Durgun. Analysis, Design, Simulation, and Measurements of Flexible High Impedance Surfaces / Thesis for the Degree, Doctor of Philosophy, ARIZONA State University, December 2013.
14. Durgun A. C. Physical Realization and Reflection Phase Characteristics of a Flexible High Impedance Surface / Ahmet C. Durgun, Constantine A. Balanis and Craig R. Birtcher // School of Electrical, Computer and Energy Engineering, Arizona State University, 1844-1847 AP-S/URSI 2011.
15. Raad H. R. Flexible and Compact AMC Based Antenna for Telemedicine Applications / Haider R. Raad, Ayman I. Abbosh, Hussain M. Al-Rizzo, and Daniel G. Rucker // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. - 2013. Vol. 61. - No. 2, pp. 524-531