

Тканые сенсорные системы для беспроводных нательных сетей

М.Е. Беспалов, Н.В. Минаева, Т.Л. Гольцева

*Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва*

Аннотация: Представлен сравнительный анализ возможностей применения тканых композиционных материалов с заданными сенсорными свойствами в качестве информационно-измерительных систем промышленного Интернета Вещей (IIoT). Подобные тканые сенсорные системы предлагается рассматривать в качестве основы для построения среды сетевого взаимодействия компонентов беспроводных нательных сенсорных сетей, а также систем мониторинга напряженно-деформированного состояния изделий из тканых композиционных материалов.

Ключевые слова: беспроводная нательная сеть, тканый сенсор, текстильный сенсор, сенсорная сеть, электронный текстиль, умная ткань, тканый композиционный материал, интернет вещей.

Формирование нового облика производства в соответствии с концепцией «Индустрия 4.0», предполагает широкое развитие технологий промышленного Интернета Вещей (Industrial Internet of Things, IIoT) [1]. Устойчивое развитие таких технологий опирается на инновационные разработки в области совершенствования технологии сбора и анализа сенсорной информации на границе сетевого периметра инфраструктуры беспроводной сети.

Актуальным направлением развития IIoT в настоящее время становится формирование из граничных устройств IIoT, находящихся на периферии сети, вычислительных кластеров, способных без обращения к головному модулю анализировать поступающую от датчиков информацию. Это направление, названное технологией периферийных или граничных вычислений (Edge Computing), пока не противопоставляется технологии облачных вычислений (Cloud Computing), но по мере совершенствования устройств и приборов, образующих «сенсорное поле», произойдет ещё более отчётливое смещение акцентов с методов централизованной обработки

сенсорной информации к использованию распределённых алгоритмов, выполняемых на граничных устройствах IoT.

Новые технологии беспроводного сетевого взаимодействия не пользователей, а компонентов технологических цепочек, требуют разработки и применения нестандартных подходов к организации сбора информации в режиме «in-line», т.е. без приостановки технологического или биофизического процесса. В последнее время отчётливо прослеживается тенденция переноса технологий беспроводного взаимодействия с традиционных объектов сетевой инфраструктуры на материальные среды, основанные на «дружественных» к человеку носителях, в частности, на изделия из тканых полотен. Безусловным преимуществом тканых сенсорных систем является высокая эргономическая составляющая создаваемых изделий, которые, сохраняя за собой привычную для человека утилитарную функцию, приобретают новое качество – способность изменять свои свойства в соответствии со значениями жизненно важных параметров жизнедеятельности организма.



Рис. 1. – Прототип тканой сенсорной системы

На рис.1 представлен вариант технической реализации портативной сенсорной системы, основанной на укладке оптоволоконных нитей в тканую

структуру перевязочного материала [2]. До последнего времени применение текстильных технологий при создании датчиков ограничивалось созданием лишь отдельных сенсорных устройств на тканой основе, в то время как в эпоху становления IoT действительно необходимо развивать технологию их беспроводного взаимодействия.

В настоящее время достижения в области миниатюризации сетевых узлов обеспечили коммерческий успех устройств так называемой «носимой электроники» [3]. Оснащение приборов повседневного использования, таких, как часы, смартфоны, брелоки, сенсорными возможностями за последние годы укрепило уверенность потребителей в необходимости применения подобных «интеллектуальных» устройств не только на производстве, но и быту.

Явные успехи в технологии интегрирования измерительной системы в контролируемый технологический процесс опираются на значительные достижения в области миниатюризации применяемых MEMS-датчиков.

Уже привычным становится оснащение подобных датчиков средствами беспроводной передачи результатов измерений. Эта возможность воплотилась в создании перспективной разновидности современных информационно-измерительных систем – беспроводных сенсорных сетей (БСС) [4].

В связи с актуальностью внедрения периферийных вычислений (Edge Computing) в практику построения современных систем сбора, обработки и анализа сенсорных данных, особого внимания заслуживает технология беспроводных нательных сенсорных сетей (БНСС). В соответствии со стандартом персонального радиодоступа Body Area Network (BAN) IEEE802.15.6, [5] под БНСС понимается разновидность информационно-измерительных сетей, предназначенная для мониторинга состояния здоровья спортсмена, пациента, пожарного, бойца спецподразделения [6].

Отличительной особенностью БНСС является размещение узлов беспроводной сети на расстоянии не более 2 см от поверхности тела человека. В зависимости от назначения беспроводной нательной сети, датчики либо имплантируются внутрь биологической ткани, либо составляют необходимый атрибут так называемой «умной» одежды.

Технология БНСС опирается на создание текстильных материалов, способных обеспечить человека комфортной одеждой, выполняющей одновременно функции системы постоянного мониторинга самочувствия её владельца. Подобные системы персонального «климат–контроля» становятся неременным атрибутом современных медицинских и нейрофизиологических исследований [6–7].

До последнего времени объект измерения и сетевая сенсорная система концептуально оставались разнородными средами, требующими для своего создания обоснованной схемы расстановки MEMS-датчиков или узлов сенсорной сети. Но в полном объёме потенциал технологий IoT может раскрыться только при условии, что система измерений будет составлять единое целое с объектом измерения.

Такими возможностями обладают многослойные тканые материалы нового поколения – 3D-ткани [8–9], в структуру которых закладываются волокна с требуемыми свойствами. Трёхмерная ткань представляет собой композиционный материал, образованный системой из трех нитей, рассматриваемой в прямоугольной или цилиндрической системе координат. Волокна могут располагаться или под углом в одной из плоскостей армирования, или быть взаимно ортогональными в трех направлениях. На рис. 2 представлена компьютерная модель взаимного расположения системы нитей в 3D-ткани, выработанной на челночном ткацком станке [10].

Использование 3D-тканых материалов в качестве армирующей среды, так называемых объёмно-армирующих тканых преформ, для полимерных

композиционных материалов становится популярным техническим решением из-за значительных технологических и эксплуатационных преимуществ, таких, как снижение стоимости и сокращение производственного цикла, большая гибкость конструкции и превосходные механические свойства.

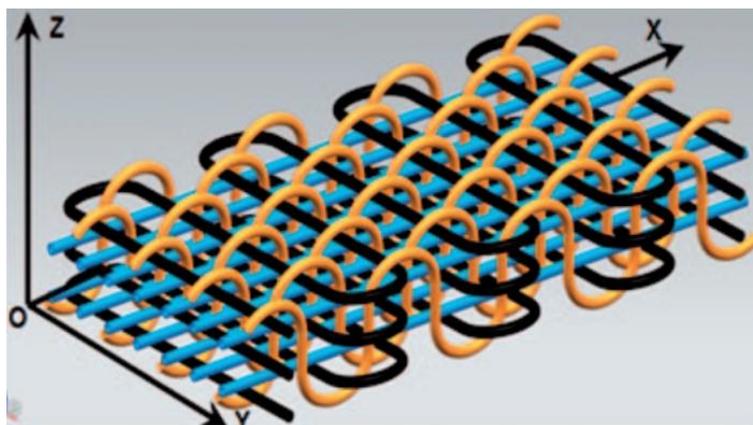


Рис. 2. – Модель структуры 3D-ткани

Классические технологические процессы текстильной промышленности, такие как ткачество и плетение позволяют создавать армирующие каркасы произвольной формы. В настоящее время выпуск подобных текстильных материалов освоен российской промышленностью. В частности, в компании ООО «СмартСервис» 3D-ткани вырабатываются на оригинальном отечественном станочном оборудовании. Для работы с углеродными, стеклянными и кварцевыми нитями рекомендуется применять челночные лентоткацкие станки, которые возможно настроить так, чтобы челнок не соприкасался с нитями основы и не деформировал их, что позволяет сохранить требуемые физико-механические свойства таких нитей в цельнотканой преформе [9].

Для придания сенсорных качеств таким многослойным 3D-тканям на этапе их выработки предлагается модифицировать их структуру путём внедрения нитей, с одной стороны, обладающих свойствами, необходимыми

для формирования каналов передачи данных, а с другой, являющимися пьезоэлектрическими датчиками, сигналы которых позволяют отслеживать динамику изменения напряжённо-деформированного состояния тканого композиционного материала [11].

Целью применения подобного «интеллектуального 3D-текстиля» является создание встроенных в композиционный материал систем сбора информации о напряжённо - деформированном состоянии конструкции или динамических процессах, протекающих в ней. Модифицированные волокна, чувствительные к деформации, встраиваются в структуру нитей, из которых затем вырабатывают 3D-ткань, которая может служить не только армирующей преформой, но и средством мониторинга изменений эксплуатационных свойств изделия, созданного из подобного тканого композиционного материала. Таким образом, подобная дополнительная функциональность реализует возможность самодиагностики текущего состояния композиционного материала как в процессе его производства (например, на этапе отверждения связующего), так и в ходе эксплуатации.

Выпуск подобным образом функционально дополненной 3D-ткани, открывает реальные перспективы для проведения натурального эксперимента по исследованию сенсорных свойств пространственно-протяжённых изделий из тканых композиционных материалов, что в настоящее время остаётся актуальной инженерно-технической задачей на фоне повсеместного применения компьютерных средств конечно-элементного анализа. Достоинством и отличительной особенностью такого подхода к организации измерений является объединение датчиков, каналов передачи данных и объекта измерения в единое целое ещё на этапе выработки тканого композита.

Именно в этом направлении развития технологий «умного» текстиля, отчётливо проявляются достоинства тканых композиционных материалов,

способных стать основой для создания беспроводных каналов сбора и передачи сенсорной информации. Таким образом, актуальной технологической задачей является исследование способов заработки сенсорных нитей в структуру многослойного тканого композиционного материала.

Другой необходимой составляющей тканой сенсорной системы, осуществляющей сетевое взаимодействие по беспроводному каналу, является создание тканых антенных устройств. В данном направлении, к настоящему времени создан существенный технологический задел, позволяющий выработать на серийном ткацком оборудовании антенные изделия, подобные представленному на рис. 3.



Рис. 3. – Антенна на тканой основе

Разработка аппаратных интерфейсов для формирования потоков информации с данными о состоянии подобных конструкций составляет перспективное направление развития научных исследований на кафедре автоматизированных систем обработки информации и управления Института мехатроники и информационных технологий РГУ им. А.Н. Косыгина [12]. Важной научно-технической задачей распределённой обработки информации в системах ПОТ является анализ эффективности

беспроводного взаимодействия узлов сенсорной сети, встроенной в многослойную ткань. При этом инструментальной оценке подлежит выявление зависимости объёма информационного покрытия встроенной в текстильный материал сенсорной сети от плотности размещения и ориентации сенсорных нитей.

Неожиданным применением рассмотренного подхода к построению тканой сенсорной системы является применение интеллектуальных полимерных композиционных материалов при разработке парусного вооружения гоночных яхт. Расширение яхтенного «гардероба» за счёт появления специализированных композитных парусов с интеллектуальными свойствами полностью вписывается в концепцию ИИТ. Подобный подход к формированию парусных сенсорных систем обеспечит экспериментальную базу для сравнительного анализа результатов натурного и вычислительного экспериментов по исследованию аэроупругого деформирования композитного паруса на основе его мембранной модели [13]. Полученные численными методами эпюры напряжений и деформаций в мембранной конечно-элементной модели спинакера в условиях нагружения со стороны окружающих парус воздушных потоков предполагается сравнить с результатами натурных экспериментов на основе анализа данных, передаваемых тканой сенсорной системой в типичных режимах эксплуатации модели парусного судна.

Таким образом, инновационный подход к построению тканой сенсорной системы для беспроводных нательных сетей способен придать необходимый импульс проектированию систем мониторинга состояния инженерных конструкций из композиционных материалов самого широкого назначения.

Литература

1. Боронин П.Н., Кучерявый А.Е. Интернет Вещей как новая концепция развития сетей связи // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2014. - №3(7). - 136 с. - С. 7-30.
2. Pasche, S., Schyrr, B., Wenger, B., et al. Smart Textiles with Biosensing Capabilities // Advances in Science and Technology. - 2012. - №80. - pp. 129 - 135.
3. Stoppa M., Chiolerio A. Wearable Electronics and Smart Textiles: Critical Review // Sensors . - 2014. - №14. - pp. 11957-11992.
4. Беспалов М.Е., Городнов И.А. Сенсорные сети как средство функциональной диагностики технологического оборудования в реальном масштабе времени // Сборник научных трудов аспирантов. Выпуск 12. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2006. - 131 с. - С.92-96.
5. IEEE Standard for local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks. // IEEE submission, Approved 6 February 2012.
6. Злотникова Р.Е. Обзор технологий беспроводных нательных сетей // Проблемы информатики. - 2018. - №1. - 80 с. - С.42-66.
7. Аль-Наггар Я.М. Кластеризация в беспроводных нательных сенсорных сетях // Информационные технологии и телекоммуникации. - 2015. - №1(9). - 156 с. - С.4-18.
8. Николаев С.Д., Сергеев В.Т. Особенности 3D-тканей и способов их изготовления // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. - 2018.- №4. - 156 с. - С.79-84.
9. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хиллов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объёмные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. - 2015. - №9. - 98 с. - С.77-85.

10. Bilisik K, Karaduman NS, Bilisik NE, Bilisik HE. Three-dimensional fully interlaced woven preforms for composites. *Textile Research Journal*. 2013;83(19):2060-2084. doi:10.1177/0040517513487791.
11. Nauman, S. Piezoresistive Sensing Approaches for Structural Health Monitoring of Polymer Composites - A Review. *Eng 2021*, 2, pp. 197-226.
12. Беспалов М.Е., Минаева Н.В. Технологии сбора сенсорных данных средствами e-textiles // В кн: Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020): сборник Материалов Международной научно-технической конференции. Часть 2. - М. ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2020. - 313 с. - С. 203-205.
13. Беспалов М.Е., Минаева Н.В. Компьютерный анализ деформирования парусной мембраны // В кн: Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2015). Часть 2. - М: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015. - 328-с. - С. 252-253.

References

1. Boronin P.N., Kucheryavy`j A.E. Informacionny`e tehnologii i telekommunikacii. 2014. №3 (7). 136 p. pp. 7-30.
2. Pasche, S., Schyrr, B., Wenger, B., et al. *Advances in Science and Technology*. 2012. №80. pp. 129-135.
3. Stoppa M., Chiolerio A. *Sensors* . 2014. №14. pp. 11957-11992.
4. Bepalov M.E., Gorodnov I.A. *Sbornik nauchny`x trudov aspirantov*. Vy`pusk 12. M. MGTU im. A.N. Kosy`gina, 2006. 131 p. pp.92-96.
5. IEEE Standard for local and metropolitan area networks. Part 15.6: Wireless Body Area Networks. IEEE submission, Approved 6 February 2012.

6. Zlotnikova R.E. Problemy` informatiki. 2018. №1. 80 p. pp.42-66.
7. Al`-Naggar Ya.M. Informacionny`e texnologii i telekommunikacii. 2015. №1 (9). 156 p. pp.4-18.
8. Nikolaev S.D., Sergeev V.T. Izv. vuzov. Texnologiya tekstil`noj promy`shlennosti. 2018. №4. 156 p. pp.79-84.
9. Doneczkij K.I., Raskutin A. E., Xilov P.A., Luk`yanenko Yu.V., Belinis P.G., Koroty`gin A.A. Trudy` VIAM. 2015. №9. 98 p. pp.77-85.
10. Bilisik K, Karaduman NS, Bilisik NE, Bilisik HE. Textile Research Journal. 2013. 83(19). pp. 2060-2084.
11. Nauman, S. A Review. Eng 2021, 2, pp. 197-226.
12. Bespalov M.E., Minaeva N.V. Texnologii sbora sensory`x danny`x sredstvami e-textiles [Technologies for collecting sensory data by means of e-textiles]. Sbornik Materialov Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Dizajn, texnologii i innovacii v tekstil`noj i legkoj promy`shlennosti» (INNOVACII-2020). Chast` 2. M.: FGBOU VO «RGU im. A.N. Kosy`gina», 2020. 313 p. pp. 203-205.
13. Bespalov M.E., Minaeva N.V. Komp`yuterny`j analiz deformirovaniya parusnoj membrany` [Computer analysis of sail membrane deformation]. Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Dizajn, texnologii i innovacii v tekstil`noj i legkoj promy`shlennosti» (INNOVACII-2015). Chast` 2. M.: FGBOU VPO «MGUDT», 2015. 328 p. pp. 252-253.