Сбор данных с нательных сенсорных сетей на основе беспилотных летающих платформ с использованием метода сетевого кодирования

Владимиров С. С.

Ключевой задачей современных информационных систем является оперативный сбор информации и передача его пользователю. Основной частью этих систем, непосредственно участвующей в сборе информации являются сенсорные сети, объединяющие разнотипные датчики и управляющие контроллеры, которые считывают с датчиков информацию, обрабатывают ее и отправляют получателю [6, 7].

Беспроводные нательные сети (БНС) являются одной из важных разновидностей сенсорных сетей. Они размещены на теле человека и считывают показания датчиков для контроля здоровья человека [5, 22, 23]. БНС широко применяются в медицинских учреждениях, профессиональном и любительском спорте, в военно-спортивных играх, активно внедряются в армии и оперативно-спасательных службах [1, 5, 12, 13, 15, 19, 24]. Управляющим контроллером БНС в зависимости от способа ее построения является пользовательское устройство общего назначения, например, смартфон или планшет, или специализированное устройство на базе микроконтроллера. В первом случае сеть БНС строится на основе широко используемой радиотехнологии, поддерживаемой большинством смартфонов, например, Wi-Fi или Bluetooth. Во втором случае выбирается наиболее подходящая радиотехнология беспроводных персональных сетей стандарта IEEE 802.15, например, ZigBee [15, 18, 22]. Организацией оперативного сбора информации с контроллеров БНС занимается центр сбора данных (ЦСД). Например, на спортивных соревнованиях своевременно получаемые судьями данные о здоровье спортсменов могут предотвратить несчастные случаи и позволить врачам быстрее среагировать на возможные травмы и предкритические состояния [15, 19].

Сеть сбора данных с БНС

Взаимодействие центра сбора данных и контроллера БНС возможно с использованием различных подходов. Если БНС территориально расположена в зоне действия более крупной сети радиодоступа, например, сотовой сети или сети WIMAX, для передачи оперативных данных имеет смысл использовать именно эту сеть. Однако, если место нахождения БНС не охвачено существующей сетью радиодоступа, либо информацию недопустимо передавать по открытым сетям, необходимо разворачивать специальную беспроводную сеть для сбора данных с БНС.

Наилучшие условия для приема радиосигнала обеспечиваются при прямой видимости передатчика и приемника, поэтому логично размещать узел сбора как можно выше над землей. Высота размещения узла сбора будет зависеть от максимальной рабочей дальности применяемой беспроводной технологии с учетом максимального расстояния от узла сбора до наиболее удаленной БНС, с которой необходимо считывать информацию. В целом, чем выше размещен узел, тем большую область покрытия он обеспечивает.

Чтобы повысить скорость развертывания сети и не зависеть от наличия строений или опор на территории ее размещения, узел сбора удобно реализовывать посредством беспилотной летающей платформы (БЛП). Такой способ позволяет размещать узел сбора на оптимальных для обеспечиваемой территории месте и высоте и при необходимости изменять его местоположение в процессе работы [16, 20].

Предлагаемая структура организации сети сбора данных на основе БЛП представлена на рис. 1.

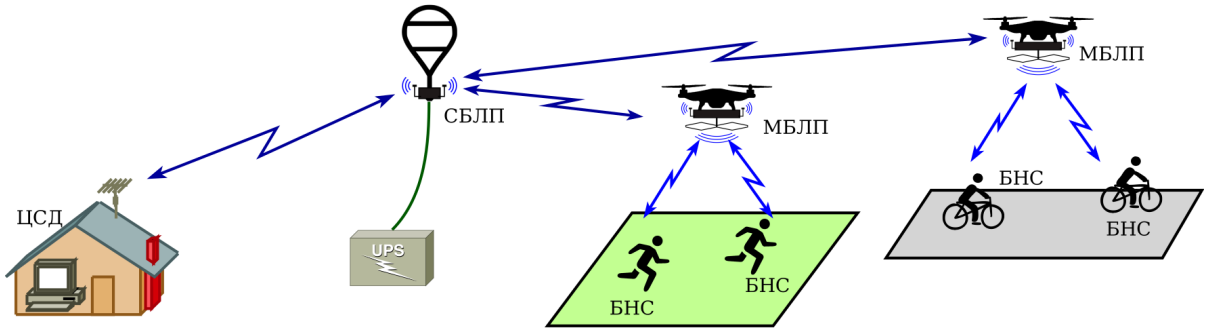

Рисунок 1. Сеть сбора данных на основе БЛП

Сеть сбора данных использует БЛП двух типов: привязную стационарную БЛП (СБЛП), выполняющую ретрансляцию собранных данных в ЦСД, и мобильные БЛП (МБЛП), которые непосредственно собирают показания с нательных сетей БНС. Привязная СБЛП за счет размещенного на земле источника питания обладает значительным временем автономной работы, что позволяет держать сеть рабочей длительное время. В качестве СБЛП удобно использовать БЛП аэростатного или мультироторного типа [2, 3, 9]. МБЛП имеют меньшее время автономной работы, но в случае необходимости их можно заменять резервными МБЛП, организовав посменную работу мобильных узлов: пока одни собирают показания, другие перезаряжаются. Поскольку МБЛП должны иметь возможность следовать за перемещающимися WBAN, имеет смысл реализовывать их как мультироторные или вертолетные БЛП [2, 3]

Как показано на рис. 1, предлагаемая сетевая структура состоит из трехэтапной цепочки взаимодействия: БНС — МБЛП — СБЛП — ЦСД.

На каждом из участков может быть применена своя наиболее подходящая технология и принцип построения. Например, на участке сбора данных БНС — МБЛП необходимо учесть ограниченный ресурс батареи носимой нательной сети, а также малый размер передаваемых показаний. Следовательно на этом участке имеет смысл применять технологии дальнего радиуса действия с пониженным энергопотреблением, относящиеся к семейству радиотехнологий LPWAN, например, LoRa [21]. Участок ретрансляции МБЛП — СБЛП — ЦСД требует передачи большего объема трафика и менее ограничен ресурсом батареи. Следовательно, здесь оптимальным видится использование более высокоскоростных технологий семейства 802.11 с увеличенным радиусом действия. Уменьшение энергопотребления и увеличение дальности работы может быть дополнительно обеспечено использованием узкополосных каналов и эффективных антенн. В частности могут быть использованы технологии 802.11y, работающая в диапазоне 3,7 ГГц, или 802.11ah, занимающая субгигагерцовый диапазон [8, 17]. Также, в случае технической возможности и наличия соответствующей инфраструктуры, на участке СБЛП — ЦСД может быть использована высокоскоростная оптическая линия связи [24].

ЦСД должен иметь возможность передавать команды управления по цепочке на любые узлы сетевой структуры: СБЛП, МБЛП и узлы БНС, и, соответственно, получать от них ответы, чтобы обеспечить возможность удаленного управления и контроля всей системы сбора данных. Учитывая, что в процессе работы мобильные узлы МБЛП могут быть вне зоны приема относительно СБЛП, а некоторые БНС терять связь с МБЛП, возникает необходимость построения взаимоувязанной системы передачи данных между узлами, при которой узлы одного уровня могут служить ретрансляторами для узлов того же уровня. Например, если одна из МБЛП находится за пределами дальности радиолинка, то вторая МБЛП может сыграть роль ретранслятора для передачи данных на СБЛП и далее в ЦСД. Аналогично, узел БНС, попавший в мертвую зону приемопередатчика МБЛП, может

получить запрос и передать ответные показания через соседнюю БНС, выполняющую роль ретранслятора.

При активной передаче значительного объема ретранслируемых данных между узлами сети на участке ретрансляции может возникать перегрузка сети. В связи с этим возникает необходимость уменьшения времени передачи так, чтобы это не повлияло на объем передаваемой информации. Одним из вариантов решения данной задачи является механизм сетевого кодирования [4, 10, 14].

Применение сетевого кодирования на участке ретрансляции сети сбора

Методика ретрансляции сообщений в радиосети посредством сетевого кодирования представлена на рис. 2. Предполагается полудуплексная система с общей разделяемой средой и временным разделением потоков передачи/приема [10].

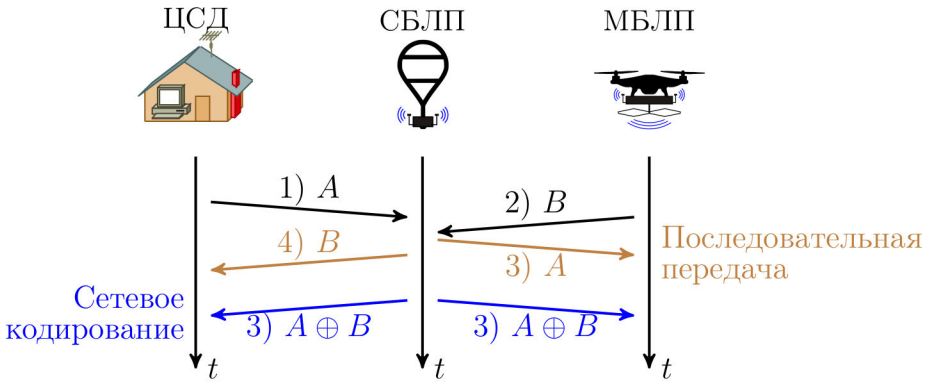

Рисунок 2. Передача сообщений на участке ретрансляции сети сбора методом сетевого кодирования

Узел-ретранслятор СБЛП должен передать сообщение A от ЦСД до узла МБЛП и одновременно передать сообщение B в обратном направлении. При обычной последовательной передаче без сетевого кодирования потребуется 4 временных интервала, как показано на рис. 2. При использовании сетевого кодирования ретранслятор СБЛП вначале получает оба сообщения A и B, а затем рассылает сводное сообщение $C = A \oplus B$ [10]. ЦСД и МБЛП складывают с полученным сообщением C свои сообщения A и B соответственно и получают направленные им пакеты всего за три временных интервала [10]:

$$\text{ЦСД}: \quad C \oplus A = A \oplus B \oplus A = B;$$
$$\text{МБЛП}: \quad C \oplus B = A \oplus B \oplus B = A.$$

Основной проблемой сетевого кодирования является большая зависимость сообщений от канальных ошибок [11]. При обычной последовательной ретрансляции сообщения, как следует из рис. 2, данные подвергаются воздействию ошибок дважды: на участке МБЛП — СБЛП и на участке СБЛП — ЦСД. При сетевом кодировании ошибки воздействуют на данные условно трижды: на сообщение A на участке ЦСД — СБЛП, на сообщение B на участке МБЛП — СБЛП и на суммарное сообщение C на обоих участках. При этом, влияние помехи на A или B до процедуры сетевого кодирования приведет к тому, что оба сообщения будут доставлены с ошибкой. С учетом влияния помех передача сообщений через систему представляется моделью на рис. 3. В качестве модели канала передачи выбран канал АБГШ.

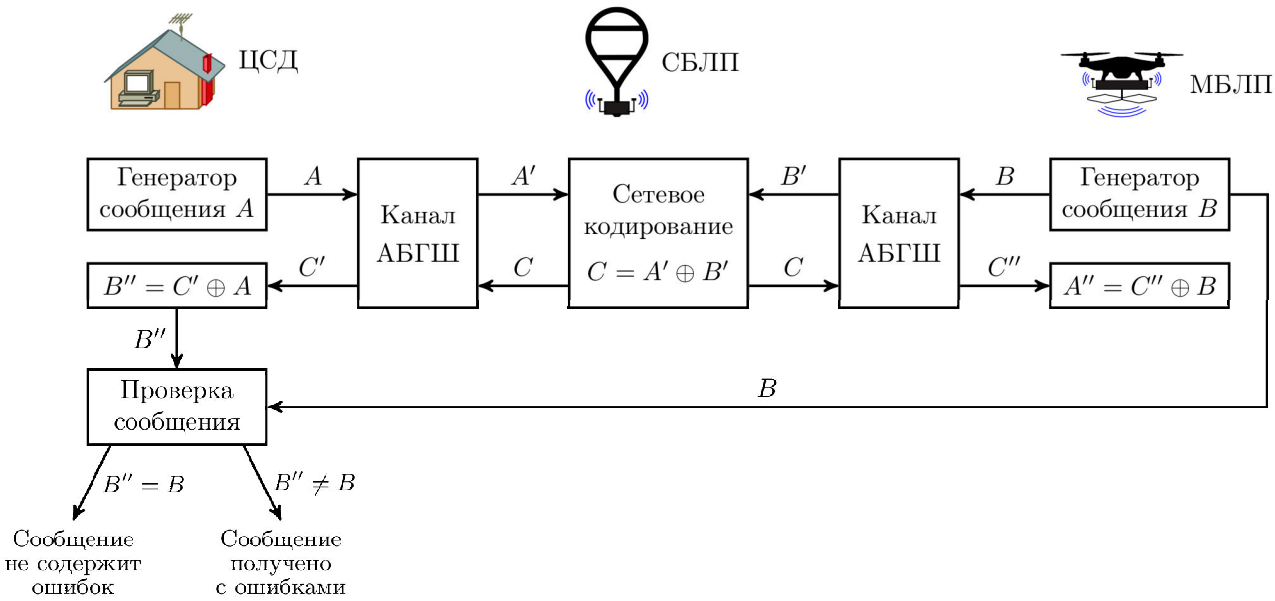

Рисунок 3. Модель передачи сообщений в сети сбора данных на основе метода сетевого кодирования

ЦСД при восстановлении сообщения B получает сообщение $B'' = A \oplus C'$, которое совпадает с сообщением B либо в случае отсутствия ошибок при передаче сообщений, либо в случае взаимной компенсации ошибок в A', B' и C'.

Для оценки границ применимости метода сетевого кодирования в рассмотренном сценарии радиосети сбора данных, проведено статистическое моделирование согласно представленной на рис. 3 модели. Моделирование проведено по методу Монте-Карло с использованием системы математических вычислений GNU/Octave для нормированного отношения сигнал/шум (ОСШ) от 4 до 12 дБ. Данные передавались пакетами размером от 50 до 300 байт. Содержимое пакетов формировалось случайным образом. Для каждого сочетания ОСШ и размера пакета через модель было передано по 10^5 пакетов данных. На приеме производилось сравнение полученного ЦСД сообщения B'' с переданным МБЛП сообщением B. Оценивались два возможных результата:

1. Пакет получен верно и не содержит ошибок.
2. Пакет получен с ошибками.

Результаты статистического моделирования представлены графиками на рис. 4.

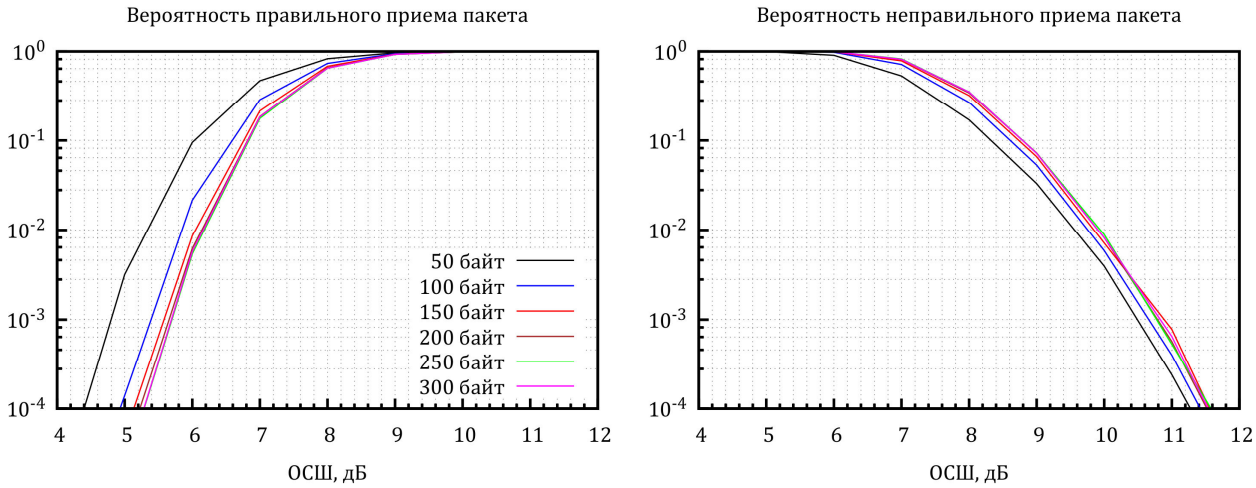

Рисунок 4. Результаты статистического моделирования

Согласно результатам моделирования передача пакетов с вероятностью ошибочного приема пакета менее 10^{-4} возможна лишь при ОСШ в канале более 11,5 дБ. При меньшем ОСШ возникают необнаруженные ошибки. Уменьшение размера пакета до 50 байт позволяет выиграть приблизительно 0,2 дБ.

Для уменьшения вероятности ошибочного приема пакетов следует использовать методы помехоустойчивого кодирования с обнаружением и исправлением ошибок, т.е. механизмы контрольной суммы и корректирующие коды.

Литература

1. **Авдонькин, Н. Н.** Система распознавания движений спортсмена на основе нательной сенсорной сети / Н. Н. Авдонькин, К. Н. Данилов, Р. Я. Пирмагомедов // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2018). Материалы XXI Международной научной конференции. - 2018. - С. 61-70.
2. **Вишневский, В. М.** Принципы построения мобильных и стационарных привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ длительного функционирования / В. М. Вишневский, С. Н. Васильев // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2017). Материалы Двадцатой международной научной конференции. - 2017. - С. 629-634.
3. **Вишневский, В. М.** Методы и алгоритмы проектирования и реализации привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ / В. М. Вишневский // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. - 2019. - С. 2910-2914.
4. **Габидулин, Э. М.** Сетевое кодирование / Э. М. Габидулин, Н. И. Пилипчук., А. И. Колыбельников и др.// Труды МФТИ. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 3-28.
5. **Дмитриев, А. С.** Сверхширокополосные беспроводные нательные сенсорные сети / А. С. Дмитриев, В. А. Лазарев, М. И. Герасимов, А. И. Рыжов // Радиотехника и электроника. - 2013. - Т. 58. № 12. - С. 1160. – DOI: 10.7868/S0033849413110028.
6. **Кучерявый, А. Е.** Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. — С.-Пб. : Типография Любавич, 2011. —312 с.
7. **Кучерявый, А. Е.** Интернет вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. - 2013. - № 1. - С. 21-24.
8. **Омётов, А. Я.** Аналитическая модель беспроводных сетей технологии IEEE 802.11ah / А. Я. Омётов, А. С. Щесняк, Е. А. Кучерявый // Электросвязь. - 2018. - № 1. - С. 51-58.
9. **Alsamhi, S. H.** An Intelligent HAP for Broadband Wireless Communications: Developments, QoS and Applications / S. H. Alsamhi, N. S. Rajput // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. – 2015. - Vol. 3, No. 2. - P. 134–143. – DOI: 10.12720/ijeee.3.2.134-143.
10. **Amanowicz, M.** On Applicability of Network Coding Technique for 6LoWPAN-based Sensor Networks / M. Amanowicz, J. Krygier // Sensors. – 2018. – Vol. 18(6). – P. 1-20. DOI:10.3390/s18061718.
11. **Cai, N.** Network coding and error correction / N. Cai, R. W. Yeung // Proceedings of the IEEE Information Theory Workshop. Bangalore, India: IEEE. – 2002. – P. 119-122. DOI: 10.1109/ITW.2002.1115432.

12. **Dinh, T. D.** Flying Network for Emergencies / T. D. Dinh, V. D. Pham, R. Kirichek, A. Koucheryavy // Communications in Computer and Information Science. – 2018. - Vol. 919. – P. 58–70. – DOI: 10.1007/978-3-319-99447-5_6.
13. **Dinh, T. D.** Unmanned aerial system-assisted wilderness search and rescue mission / T. D. Dinh, R. Pirmagomedov, V. D. Pham, A. A. Ahmed, R. Kirichek, R. Glushakov, A. Vladyko. // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2019. – Vol. 15, Iss. 6. – P. 1–15. – DOI: 10.1177/1550147719850719.
14. **Fragouli, C.** Network Coding Fundamentals / C. Fragouli, E. Soljanin // Foundations and Trends in Networking. – 2007. – Vol. 2, No 1. – P. 1-133. DOI: 10.1561/1300000003.
15. **Ghamari, M.** A Survey on Wireless Body Area Networks for eHealthcare Systems in Residential Environments / M. Ghamari, B. Janko, R. S. Sherratt, W. Harwin, R. Piechockic, C. Soltanpur // Sensors. – 2016. - Vol. 16. - Art. 831. – DOI: 10.3390/s16060831.
16. **Ha, I.** Unmanned Aerial Vehicles-based Health Monitoring System for Prevention of Disaster in Activities of the Mountain / I. Ha, Y.-Z. Cho // International Journal of Control and Automation. – 2016. - Vol. 9, No. 9. - P. 353–362. – DOI: 10.14257/ijca.2016.9.9.34.
17. **IEEE 802.11y-2008.** IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: 3650-3700 MHz Operation in USA. IEEE Std 802.11y-2008. - IEEE, 2008.
18. **IEEE 802.15.6-2012.** IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks. IEEE Std 802.15.6-2012. - IEEE, 2012, - 271 p.
19. **Kirichek, R.** Live Substance in Cyberspace - Biodriver System / R. Kirichek, R. Pirmagomedov, R. Glushakov, A. Koucheryavy // 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT) 2016. – Pyeongchang, South Korea ; IEEE, 2016. – P. 274–278. – DOI: 10.1109/ICACT.2016.7423358.
20. **Kirichek, R.** The model of data delivery from the wireless body area network to the cloud server with the use of unmanned aerial vehicles / R. Kirichek // Proceedings 30th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS). —Regensburg, Germany, 2016. – P. 603–606. – DOI: 10.7148/2016-0603.
21. **Kirichek, R.** Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using LPWAN Protocols / R. Kirichek, V. Kulik. // Communications in Computer and Information Science. – 2016. - Vol. 678. - P. 442–453. – DOI: 10.1007/978-3-319-51917-3_39.
22. **Movassaghi, S.** Wireless Body Area Networks: A Survey / S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, A. Jamalipour // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. - Vol. 16, No. 3. - P. 1658–1686.
23. **Schmidt, R.** Body Area Network BAN – a Key Infrastructure Element for Patient-Centered Medical Applications / R. Schmidt, T. Norgall, J. Morsdorf, J. Bernhard, T. Grun // Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering. -2002. - Vol. 47, Iss. s1a. P. 365–368.
24. **Wu, F.** An Internet-of-Things (IoT) Network System for Connected Safety and Health Monitoring Applications / F. Wu, T. Wu, M. R. Yuce // Sensors. – 2019. - Vol. 19, Iss. 1. - Art. 21. – DOI: 10.3390/s19010021.