
УДК 621.391

Анализ возможностей построения энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей для мониторинга работы двигателей

Удодов А.Н.

Корпорация «Климов»,

Кантемировская ул., 11, Санкт-Петербург, 194100, Россия

e-mail: udodov.andrey@gmail.com

Аннотация

Объектом исследования являются способы передачи информации в беспроводной информационной сети между сенсорной подсистемой и электронным блоком управления двигателя, а также вопросы электропитания компонентов данной сети.

Цель работы состоит в разработке концепции системы автоматического управления, контроля и диагностики для управления газотурбинными двигателями и его системами, а также для контроля и диагностики технического состояния двигателя.

Исследованы, обоснованы и выбраны методы и средства реализации сети беспроводной передачи данных, а также решения проблемы организация питания узлов системы в условиях ее применения в системе автоматического управления двигателя. Предложена схема построения энергоэффективного приемо-передающего устройства. Приведены расчеты, позволяющие определить максимальную скорость передачи информации в сети при заданных требованиях по дальности передачи, длительности сигнала и вероятности ошибки при приеме.

Ключевые слова: беспроводная передача данных, сверхширокополосные сигналы, сенсорные сети, сенсор, датчик, энергоэффективность, термоэлектрическое преобразование, автономные генераторы.

При построении классических систем контроля и мониторинга работы авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) одной из основных проблем является наличие большого числа проводов и соединений, что оказывает негативное влияние на надежность – порядка 30% возникающих отказов существующих систем управления двигателем приходится на различные дефекты контактов; масштабируемость и общую массу системы.

Одним из путей решения данной проблемы является использование беспроводных сенсорных сетей (БСС) в качестве альтернативы классическим проводным схемам соединений сенсорной подсистемы контроля и мониторинга работы двигателя с управляющим контроллером.

При использовании радиоканала для передачи информации о различных параметрах двигателя и управляющих команд исполнительным устройствам появляется возможность снизить общую массу системы [1,2], повысить ее надежность за счет меньшего числа соединений [3] и, при необходимости, гибко варьировать количество компонентов системы без каких-либо серьезных изменений конструкции. Замена всего 50% кабельных соединений в системе управления на вертолете SikorskySH 60 позволяет получить выигрыш в массе порядка 120 кг [2].

Также применение БСС предоставляет возможность введения унификации узлов для реализации функции контроля и управления различных двигателей.

Для выполнения требований по надежности, электромагнитной совместимости, стойкости к внешним воздействующим факторам (ВВФ) и конструктивных требований, накладываемых на систему мониторинга, при построении БСС необходимо обеспечить:

- Стабильность и надежность беспроводной передачи данных между компонентами системы, расположенными внутри и на двигателе, в многолучевом канале.
- Автономное электропитание узлов системы.
- Работу узлов в условия высоких (до 160°C) температур.
- Уменьшение массогабаритных характеристик узлов системы.

Центральное место здесь занимает проблема организации стабильного электропитания узлов сети. В условиях высоких температур серьезно увеличивается саморазряд конденсаторов и аккумуляторов [4], что накладывает дополнительные требования по автономности систем питания.

Современные беспроводные сенсорные сети промышленного применения представлены следующими технологиями:

- Семейство, использующее физический уровень стандарта IEEE 802.15.4 - ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART и ISA 100.11a;
- EnOcean, ISO/IEC 14543-3-10

- DASH7, ISO/IEC 18000-7
- Bluetooth, IEEE 802.15.1
- ONE-NET

Все данные системы являются традиционными узкополосными системами, строящимися по супергетеродинной схеме с преобразованием частоты (рис. 1) [5-8].

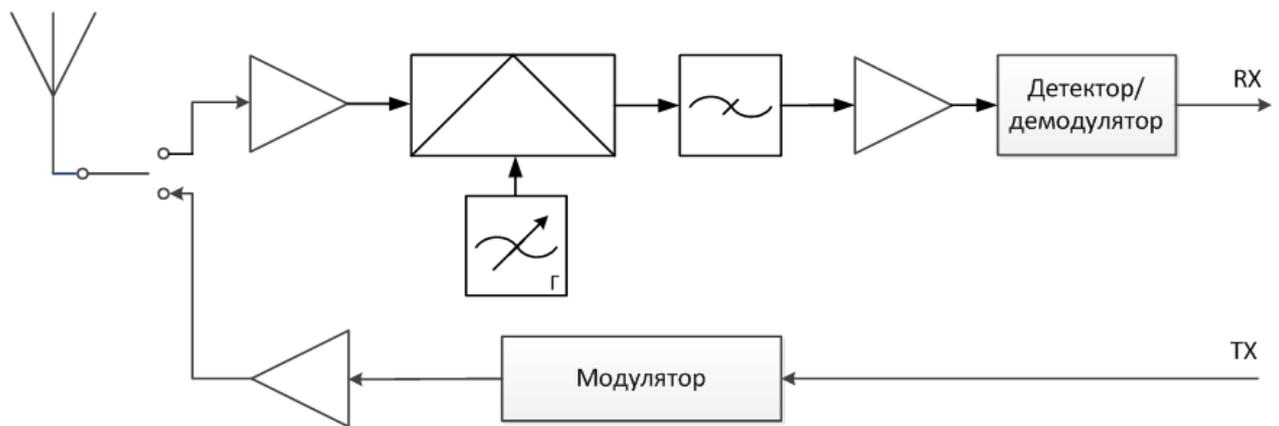


Рис. 1 Схема супергетеродинного приемника

В случае же применения схемы прямого усиления (рис. 2) появляется возможность значительно упростить конструкцию приемопередатчика, и как следствие, уменьшить размеры и энергопотребление конечного устройства. Применить данную схему можно при использовании т.н. сверхширокополосных сигналов.

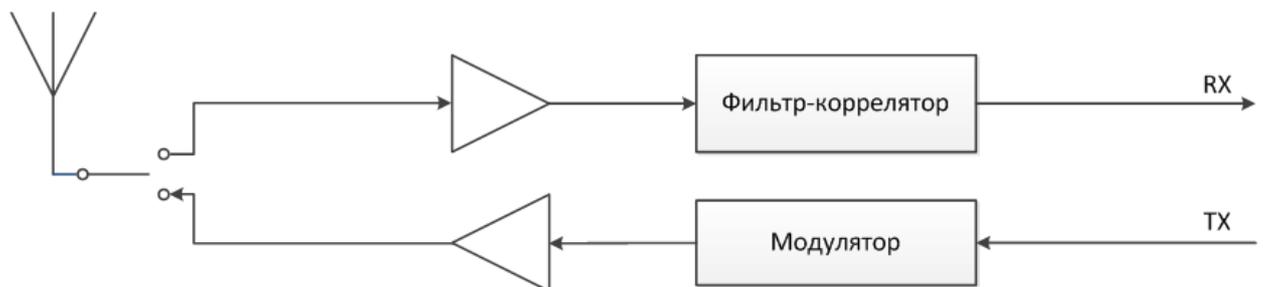


Рис. 2 Схема приемника прямого усиления

Характеристики систем с использованием технологии импульсной передачи СШП сигналов позволяют их эффективное использование для построения БСС, организующей обмен между узлами сенсорной подсистемы АГТД в сложной помеховой обстановке и при строгих энергетических ограничениях. В отличие от традиционных систем беспроводной передачи, СШП передатчик генерирует очень короткий по времени импульс, который может распространяться и нести в себе информацию без необходимости дополнительной модуляции несущей. Передача коротких СШП импульсов требует намного меньше энергии, чем передача сопоставимого узкополосного сигнала. В случае работы системы в маломощном режиме, узлы БСС, основанной на СШП сигналах, могут взаимодействовать только с ближайшими соседями; при этом облегчается решение проблемы наличия межканальной интерференции, имеющей место при использовании узкополосной связи.

В качестве решения проблемы обеспечения электропитания узлов беспроводной сети системы мониторинга АГТД могут быть применены автономные источники питания, позволяющие получать энергию из окружающей среды. Наиболее перспективными для установки на двигателе источниками являются термоэлектрические или вибромеханические (электромагнитные или пьезоэлектрические) преобразователи [2]. Одним из основных недостатков вибромеханических преобразователей является их ограничения по рабочей частоте колебаний, что при наличии в устройстве движущихся частей может существенно снизить надежность системы.

Рассмотрим упрощенную структурную схему узла предлагаемой беспроводной сети (рис. 3).

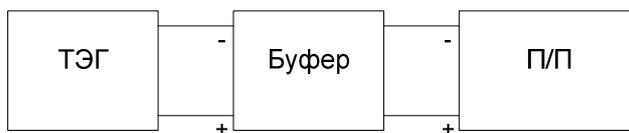


Рис. 3 Упрощенная структурная схема узла БСС

Термоэлектрический генератор (ТЭГ) при наличии постоянного градиента температуры вырабатывает ток I_T напряжением U_T . Ток поступает в буферное устройство (это может быть как обычный конденсатор так и ионистор (суперконденсатор)) емкостью C для накопления энергии.

Потребителем накопленной энергии является сверхширокополосный приемопередатчик П/П, имеющий следующие параметры: напряжение питания $U_{пит}$, ток потребления в режиме простоя $I_{потр.мин}$, длительность передачи информационного сигнала t_s . Одним из основных параметров беспроводной передачи данных является вероятность ошибки $P_{ош}$. Она выражается зависимостью от отношения сигнал/шум на входе приемника:

$$P_{ош} = f(P_c/P_{ш}) \quad (1)$$

Мощность сигнала на входе приемника зависит от мощности передачи и при передаче на расстояние x , в идеальных условиях, затухает пропорционально $1/x^2$. В зависимости от требований по мощности передаваемого сигнала (предположим, что вся потребляемая мощность идет на передачу) будет меняться ток потребления приемопередатчика $I_{потр}$.

Таким образом, для того чтобы определить требования к термоэлектрическому генератору и буферному устройству, необходимо вычислить следующие параметры: ток потребления приемопередатчика $I_{\text{потр}}$, емкость буферного устройства C .

$$I_{\text{потр}} = \frac{P_c x^2}{U_{\text{пит}}} \quad (2)$$

Как известно, процесс заряда конденсатора проходит по следующему закону:

$$U(t) = U_r \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \right) \quad (3)$$

У данного закона имеется характерная величина – постоянная времени τ , которая равна времени заряда конденсатора до 63% емкости:

$$\tau = RC \quad (4)$$

В дальнейшем скорость заряда, ввиду экспоненциального характера закона, замедляется, в связи с чем учтем это при расчете необходимой емкости конденсатора:

$$C = \frac{2(P_c + P_{\text{idle}})t_s}{U_r^2} \quad (5)$$

Здесь P_{idle} – мощность, потребляемая приемопередатчиком во время отсутствия передачи. В предлагаемом режиме конденсатор постоянно накапливает от энергии термоэлектрического генератора, и, по достижении полного заряда, появляется возможность передачи короткого импульсного сигнала

приемопередатчиком. В таком режиме напряжение на конденсаторе во время отсутствия передачи будет изменяться по следующему закону:

$$U(t) = U_{\text{пит}} \exp\left(\frac{-t}{R_{\text{idle}}C}\right) + U_{\Gamma} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{\Gamma}C}\right)\right) \quad (6)$$

В момент передачи:

$$U(t) = U_{\text{пит}} \exp\left(\frac{-t}{R_{\text{H}}C}\right) + U_{\Gamma} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{\Gamma}C}\right)\right) \quad (7)$$

Здесь R_{H} – сопротивление нагрузки (приемопередатчика) в момент передачи, а R_{idle} – во время ее отсутствия. В зависимости от потребляемой мощности приемопередатчика они равны:

$$R_{\text{H}} = \frac{U_{\text{пит}}^2}{P_{\text{сх}}^2} \quad (8)$$

$$R_{\text{idle}} = \frac{U_{\text{пит}}^2}{P_{\text{сmin}}} \quad (9)$$

Путем подстановки данных формул в выражения (6) и (7) мы получаем зависимость напряжения на конденсаторе от мощности, необходимой дальности передачи и длительности сигнала, в импульсном режиме работы приемопередатчика. По данной зависимости можно определить минимально возможный интервал между передачами сигнала и, соответственно, максимальную скорость передачи информации.

Расчеты с использованием полученных формул показывают, что теоретически достижимая скорость передачи данных предлагаемым автономным приемопередатчиком при использовании 10 сверхширокополосных импульсов на бит составляет 1,88 Мбит/с. Дальность действия приемопередатчика была принята за 1,2 м, отношение сигнал/шум на входе приемника 1,76дБ, длительность сигнала 1нс.

Временные диаграммы напряжения на конденсаторе приведены на рис. 4.

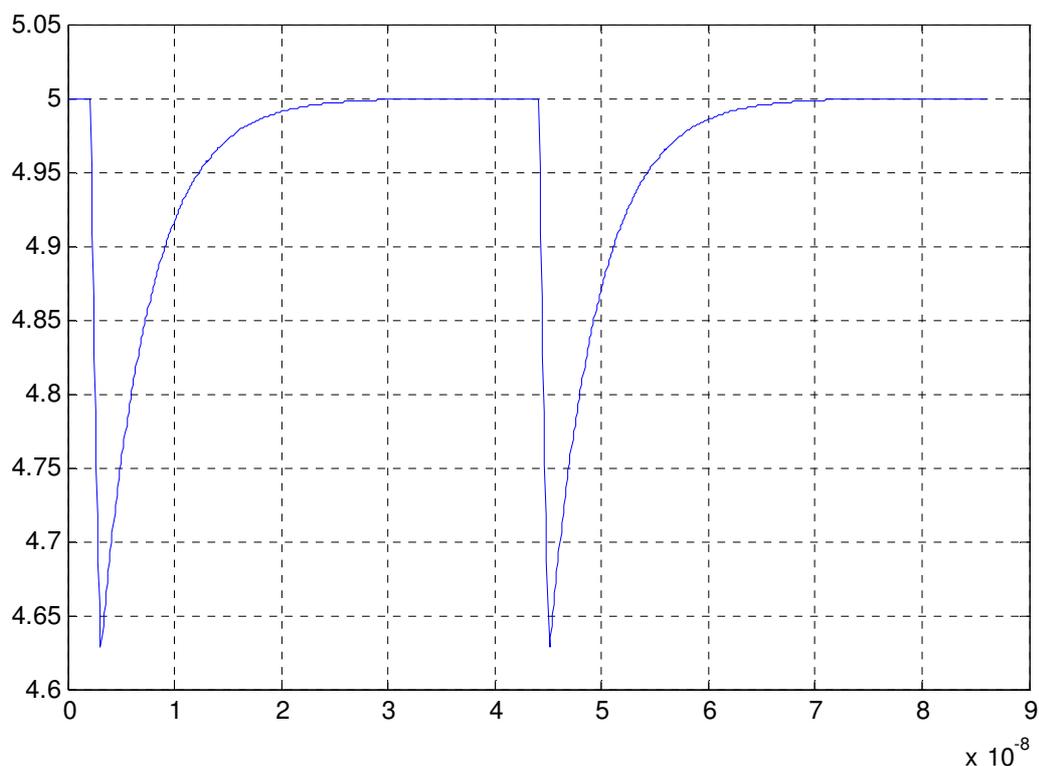


Рис. 4 Изменение напряжения на конденсаторе в процессе работы устройства

По приведенным диаграммам можно видеть, что существует возможность уменьшения интервала между передачами за счет использования более низких допустимых напряжений питания приемопередатчика (в приведенном примере

напряжение питания принято равным напряжению, снимаемому с термоэлектрического генератора).

Таким образом, применение технологий термоэлектрического преобразования и импульсной передачи данных на основе сверхширокополосных сигналов позволит построить энергоэффективную беспроводную систему управления и контроля работы газотурбинного двигателя с автономными приемно-передающими устройствами для обеспечения работы системы на расстояниях до нескольких метров.

Библиографический список

1. Normann R.A. «First High-Temperature Electronics Products Survey 2005», Sandia National Laboratories, April 2006
2. Rama K. Yedavalli, Rohit K. Belapurkar «Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems», J Control Theory Appl 2011, 9 (1), 28–33
3. Стандарт MIL-HDBK-217F, US Department of Defence, 1991
4. Ni-MH Technical Bulletin, Duracell, 2006
5. H.Fornazier, A. Martin, S. Messner “Wireless Communication: Wi-Fi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, DASH7”, 16 March 2012
6. K.Gravogl, J.Haase, C. Grimm, “Choosing the best wireless protocol for typical applications”, February 2011
7. JP Norair, “Introduction to DASH7 Technologies”, Low Power RF Technical Overview, 16 March 2009

8. К.Верхулевский, Ю.Шаропин «Открытый стандарт беспроводной сети ONE-NET и аппаратные решения на его основе (часть 1)», Современная электроника, №8, 2008, 12–15