

УДК 621.452.3:681.51.001.891

**Современные беспроводные технологии:
проблемы применения на авиационном борту**

Гуревич О.С.^{*}, Кессельман М.Г.^{}, Трофимов А.С.^{***}, Чернышов В.И.^{****}**

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,

ЦИАМ, Авиамоторная ул., 2, Москва, 111116, Россия

**e-mail: gurevich_os@ciam.ru*

***e-mail: mgk_ctrl@ciam.ru*

****e-mail: trofimov-control@ciam.ru*

*****e-mail: vi_chernyshov@ciam.ru*

Аннотация

Беспроводные технологии в настоящее время в силу известных преимуществ находят все больше распространение в системах, используемых в различных областях техники. В авиационной промышленности начался активный процесс поиска направлений внедрения беспроводных систем и устройств, где в короткие сроки можно получить ощутимый экономический эффект.

В статье рассмотрены особенности применения беспроводных технологий в беспроводных авиационных бортовых системах. Проанализированы материалы зарубежных фирм по исследованию возможности применения на авиационном борту беспроводных протоколов стандарта IEEE 802.11. Приведены результаты исследования возможности применения узкополосной беспроводной передачи данных на частоте 868 МГц в беспроводной системе автоматического управления авиадвигателя, проведенные на лабораторном комплексе ЦИАМ.

Ключевые слова: беспроводная система автоматического управления авиадвигателя, беспроводные сенсорные сети и датчики, трансивер, радиоканал.

Введение

Беспроводные технологии в настоящее время находят все большее распространение в системах, используемых в различных областях техники. В авиационной промышленности начался активный процесс поиска направлений внедрения беспроводных систем и устройств, где в короткие сроки можно получить ощутимый экономический эффект. Экспертные оценки показывают, что внедрение беспроводных технологий позволит создать высокоэффективные системы управления, контроля и диагностики нового поколения с гибкой, легко изменяемой структурой, уменьшить на 20...40% массу и габариты системы за счет уменьшения количества разъемов и кабелей, повысить надежность (сокращение количества разъемов и реконфигурация беспроводной сети), снизить в 5...8 раз затраты на техническое обслуживание систем, упростить маршрутизацию и монтаж кабелей на борту, упростить модернизацию систем, повысить пожаробезопасность.

Успешными можно считать примеры применения беспроводной сенсорной сети в бортовых системах, не являющихся критичными для безопасности самолета. Например, на авиационном рынке уже предлагается сертифицированная по RTCA/DO-160 беспроводная система контроля задымления ST3000 (рис. 1), разработанная фирмой Securaplane technologies [1].

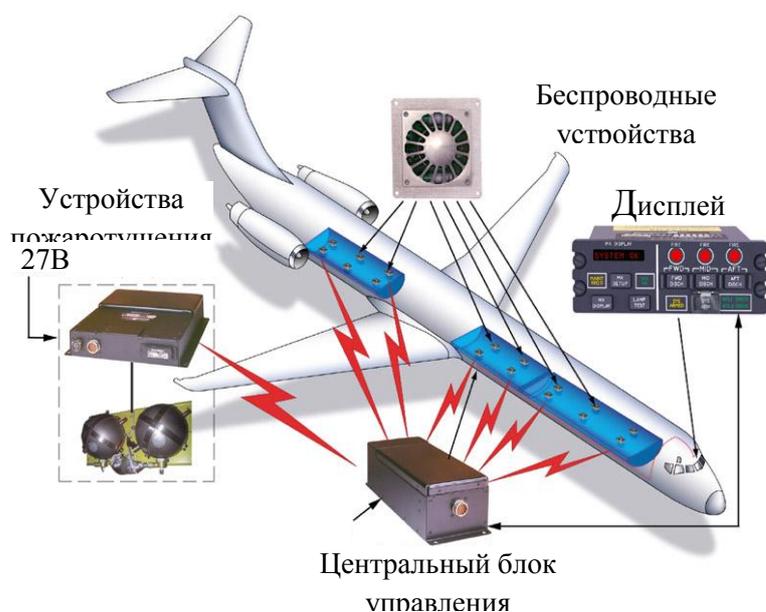


Рис. 1 - Беспроводная система контроля задымления

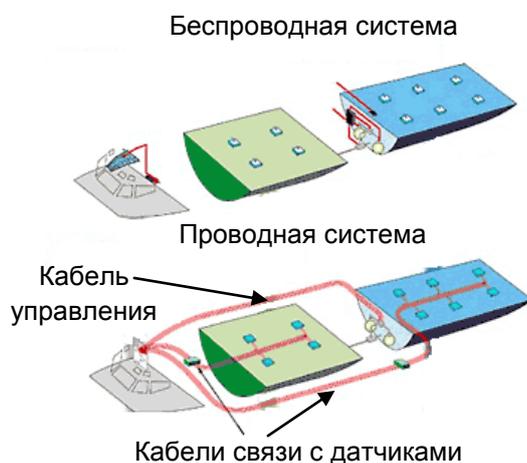


Рис. 2 - Компонка проводной и беспроводной систем контроля задымления

Беспроводная система контроля заменяет проводную систему, включающую в себя более 100 кг проводов (рис. 2).

Применение беспроводных технологий в таких критически важных системах, как управление полетом или работой двигателя, связано с рядом противоречивых требований. Для надежной передачи данных в режиме реального времени по радиоканалу с частотой информационного обмена от 30 до 100 Гц между узлами беспроводной сети, находящимися вне пределов прямой видимости, с учетом

экранирования металлическими конструкциями и затухания сигнала необходимо в условиях сложной электромагнитной обстановки на борту увеличение мощности приемо-передатчиков (трансиверов). Однако электроснабжение беспроводных бортовых устройств от автономных источников питания, предотвращение влияния излучений на работу соседних радиоканалов и электронного бортового оборудования требует низкого собственного энергопотребления.

Исследование возможности применения беспроводных протоколов стандарта IEEE 802.11

В рамках европейского проекта «WILDCRAFT» (Wireless Smart Distributed End System for Aircraft) европейской программы «Чистое небо» при выборе и анализе беспроводной связи в бортовой авиационной системе отмечены проблема согласования потребления электроэнергии со скоростью передачи данных, полосой частот и диапазоном [2]. Исследовались только стандарты связи на частоте 2,4 ГГц, которая принимается во всем мире как нелицензируемый диапазон. В ней наблюдаются наибольшие темпы развития как методов и технологий радиочастотной передачи данных, так и компонентов для их реализации. В экспериментах использовались коммерческие COTS-компоненты с низкой стоимостью, с термостойкостью до + 85 °С. Для выбора беспроводного протокола сети проведен сравнительный анализ стандартов IEEE 802.11 a/b/g (таблица 1).

Протоколы стандартов IEEE 802.11 a/b/g

Стандарт	Тип модуляции	Частотный диапазон	Скорость передачи	Преимущества	Недостатки
802.11a	OFDM	5 ГГц UNII	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Mbps	Низкое взаимное влияние в полосе частот. Высокоскоростной протокол	Высокая цена. Малый диапазон
802.11b	DSSS FHSS	2.4 ГГц ISM	1, 2, 5.5 и 11 Mbps	Большая дальность. Низкая цена	Низкоскоростной протокол. Более заполненный диапазон
802.11g	OFDM DSSS	2.4 ГГц ISM	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Mbps	Совместимость со стандартом 802.11b. Высокоскоростной протокол	Более заполненный диапазон

Результаты оценки беспроводных протоколов ZigBee, Bluetooth и Wi-Fi по скорости передачи данных, энергопотреблению и удалению узлов представлены на рис. 3 [3].

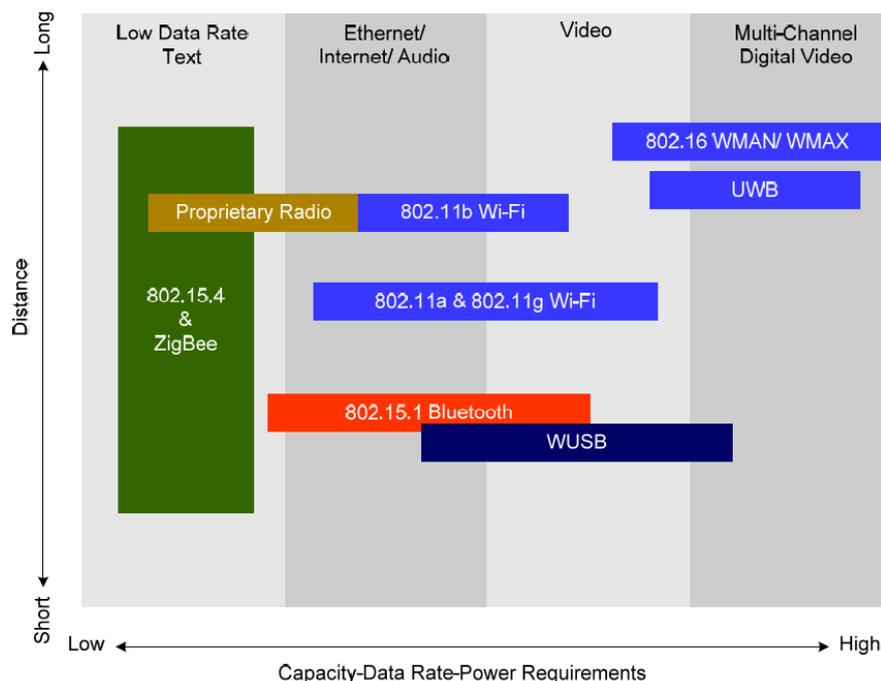


Рис. 3. Сравнение беспроводных стандартов по скорости передачи данных/энергопотреблению и удалению узлов

ZigBee находится в нижней части рисунка с точки зрения скорости передачи данных и требования к питанию, что делает его пригодным для применения, например, в системе диагностики, где узлы могут работать с питанием от батареи в течение многих лет. Уже имеются беспроводные датчики деформации, акселерометры и ряд других от различных поставщиков, которые построены с использованием технологии стандарта ZigBee.

WiMAX (справа вверху на рис. 3) представляет собой отраслевую спецификацию стандарта IEEE 802.16. Он обеспечивает наибольшую скорость передачи данных при самом большом энергопотреблении.

Обеспечивается широкий диапазон от 2 до 11 ГГц частот спектра, скорость передачи данных 10 Мбит/с в радиусе 16 км. Протокол Wi-Fi, или стандарт

IEEE 802.11, находится в пределах среднего уровня рис. 3. Он имеет высокую скорость передачи данных (до 11 Мбит/с для 802.11 b и 54 Мбит/с для 802.11 a/g), средний рабочий диапазон и среднюю потребляемую мощность.

В проекте «WILDCRAFT» показано, что при больших объемах передаваемых данных, например, 32 кбит, от сенсорных узлов, содержащих несколько датчиков, количество данных для передачи между узлами делает Wi-Fi лучшим выбором для бортовой беспроводной сети, хотя приемопередатчики Wi-Fi потребляют значительно большую мощность по сравнению с ZIGBEE в режимах приема/передачи. Это является следствием того, что значительно увеличивается пропускная способность с лучшими удельными показателями расхода энергии (нДж/бит), но при общем сокращении рабочего времени аккумулятора, так как собственное потребление тока приемопередатчиками Wi-Fi в 2,5 раза выше, чем у ZIGBEE. Если длина данных составляет 10 кбит, разница между Wi-Fi и Zigbee уменьшается.

Одной из основных проблем в реализации беспроводных технологий на борту самолета является помехозащищенность беспроводного канала связи и электромагнитная совместимость (ЭМС). Возможно электромагнитное взаимодействие бортового радио и навигационного оборудования с этими беспроводными устройствами. Следует также учитывать дополнительные факторы и особенности этих технологий: электромагнитный шум, отражения сигналов от препятствий (многолучевое замирание), взаимные помехи других устройств того же канала или соседних частот, затухание сигнала в окружающей среде. Для

исследования влияния этих факторов на работоспособность и производительность беспроводной бортовой сети необходимы специальные экспериментальные исследования [4].

Бортовые системы самолета используют полосы частоты электромагнитного спектра от нескольких килоггерц до нескольких тысяч мегагерц. В низкочастотной части спектра находится старая навигационная система Омега, которая работает в диапазоне частот 10-14 кГц. В высокочастотной части находится радиолокационная система погоды, которая работает на 5,440 и 9,350 МГц. Частотный диапазон работы некоторых систем самолета и приведен в таблице 2 [5].

Таблица 2

Радиочастотные диапазоны бортовых систем самолета

Частотный диапазон	Устройство
190-1750 кГц	Автоматический радиокompас
2-30 МГц	Высокочастотная радиосвязь
75 МГц	Маркерный радиомаяк
108-112 МГц	Курсовой посадочный радиомаяк
108-118 МГц	Курсовой всенаправленный радиомаяк СВЧ-
118-137 МГц	Сверхвысокочастотная радиосвязь
329-335 МГц	Глиссадный радиомаяк
962-1213 МГц	Дальномерное оборудование
1030, 1090 МГц	Система управления воздушным движением
1030, 1090 МГц	Бортовая система предупреждения
1530-1660 МГц	Система спутниковой связи
1575,42 МГц	Система глобального позиционирования
4235-4365 МГц	Радиовысотомер
5031-5091 МГц	Микроволновая система обеспечения посадки
5440, 9350 МГц	Метеорологическая радиолокационная станция

Пассажиры с переносными электронными устройствами и мобильными телефонами на борту самолета также могут мешать работе радио и навигационного оборудования. NASA провел несколько экспериментальных исследований по Программе обеспечения безопасности полетов при поддержке Управления по сертификации воздушных судов FAA на четырех самолетах Боинг-747-400 и шести Боинг-737-200 [5]. В результате разработан процесс измерения и контроля выбросов и паразитных излучений от различных устройств в реверберационных камерах и установлены предельно допустимые значения излучений в FCC и RTCA/DO-160.

Семь стандартов IEEE 802.11b и IEEE 802.11a и пять устройств были протестированы в LaRC NASA. Результаты испытаний беспроводных устройств показывают, что максимальные значения выбросов по стандарту IEEE 802.11 a и 802.11 b меньше предельно допустимых значений FCC часть 15 и RTCA/DO-160 категории M.

На самолете Cessna-172 были проведены летные испытания беспроводной бортовой навигационной сети [6]. Испытывались навигационные датчики NAV420 и GPS 15L, входящие в сенсорный узел вместе с 2-х портовым беспроводным сервером WiBox и автономным источником питания. Пользовательский интерфейс разработан на ноутбуке с программным обеспечением перемещения по карте, которое получает данные от датчиков узла. Для передачи данных с частотой 100 Гц в полосе частот 2,4 ГГц применены беспроводные устройства Wi-Fi по стандарту IEEE 802.11g. В результате испытаний установлено, что при различных условиях эксплуатации на земле и в ходе летных испытаний в экспериментальном образце

беспроводной бортовой сети обеспечивалась надежная передача данных. Успешная передача пакетов данных составила более 91% (Рис. 4).

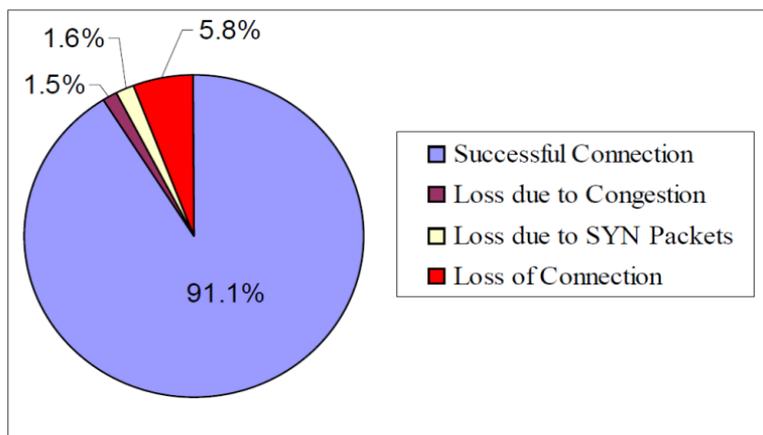


Рис. 4. Результаты летных испытаний. Тест 1.

Successful Connection – успешные соединения 91,1%, Loss due to Congestion – потери из-за перегрузки 1,5%, Loss due to SYN Packets - потери пакетов из-за синхронизации 1,6%, Loss of Connection – потеря соединения 5,8%

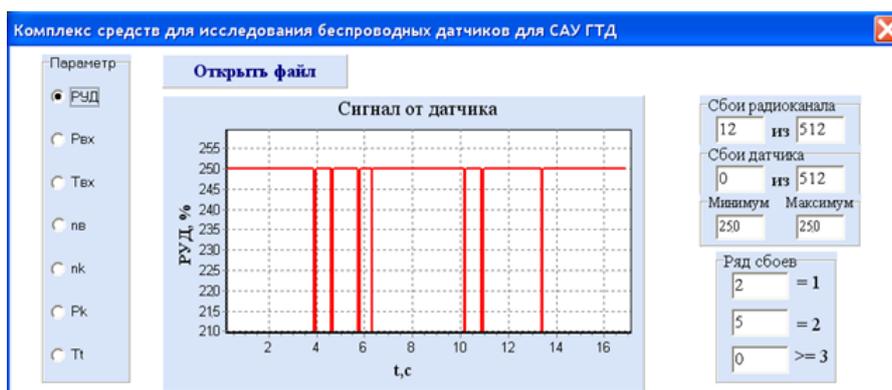
В процессе испытаний не наблюдалось никакого влияния беспроводного оборудования на работу штатной бортовой авионики. Вместе с тем достаточно высокое энергопотребление высокоскоростного Wi-Fi потребовало применения отдельной батареи 12 В 5 А значительной емкости и габаритов, что неприемлемо для автономного питания отдельных беспроводных датчиков, таких как датчик частоты вращения ротора двигателя и др. Зафиксировано отдельное ухудшение производительности сети, наблюдавшееся во время полета, из-за потери нескольких пакетов синхронизации, что требует дополнительных исследований.

На лабораторном стенде ЦИАМ проведено исследование устойчивости работы канала связи на частоте 2,4 ГГц беспроводного датчика положения рычага управления двигателем (радио-РУД) с центральным радиомодулем беспроводной системы автоматического управления (САУ) авиадвигателя при действии помех,

создаваемых гарнитурой «Bluetooth» мобильного телефона GSM, работающей также в диапазоне частот 2,4 ГГц. Устойчивость работы информационного канала оценивалась с помощью комплекса аппаратно-программных средств, главное «окно» которого приведено на рис. 5. Первоначально гарнитура «Bluetooth» располагалась на расстоянии 1,0 м от беспроводного датчика. При этом наблюдалась устойчивая работа беспроводного ИК без сбоев (см. рис.5 а). При расстоянии менее 0,4 м в работе канала связи беспроводного датчика возникали одиночные сбои (см. рис.5 б). Появление одиночных сбоев в работе беспроводного датчика требует применения в САУ специальных средств для их парирования.



а)



б)

Рис. 5. Осциллограммы работы радио-РУД при помехе от «Bluetooth» на расстояниях: а) - 1 м; б) - 0,4 м

Альтернативный нелицензируемый диапазон 5 ГГц менее загружен, чем 2,4 ГГц, но расстояние его действия ограничено (около десяти метров). При этом антенны должны быть направлены по линии визирования. Мощность более высокочастотного сигнала значительно снижается при прохождении через конструкцию самолета и двигателя. Для устойчивой работы беспроводной сети может потребоваться дополнительное введение ретрансляторов сигналов датчиков. Для применения в критически важных авиационных системах эффективной может быть беспроводная узкополосная или сверхширокополосная передача данных [7].

Исследование возможности применения узкополосной передачи данных в беспроводной САУ авиадвигателя

По мнению Ричарда Харада — эксперта компании Psion Teklogix [8] беспроводное устройство передачи данных, работающее в диапазоне 2,4 ГГц, подвержено в 100 тыс. раз более высоким шумовым помехам, нежели узкополосное устройство в диапазоне 400 МГц. В диапазоне 434/868 МГц сигналы в большей степени способны огибать препятствия, их затухание меньше. Беспроводные датчики САУ ГТД должны обладать низким энергопотреблением, обеспечивать надежную приемо-передачу данных в условиях «радиозатенения» и поглощения сигнала конструкцией двигателя. Этим требованиям в нелицензируемом диапазоне частот в большей степени соответствует беспроводная технология на частоте 868 МГц. Трансиверы на частоте 868 МГц потребляют ток в 2 раза меньше, чем ZigBee-трансиверы, они более простые, имеют меньшую стоимость. На их основе

можно создавать необходимые для САУ топологии «звезда» и «сеть» с промежуточными ретрансляторами.

С целью исследования возможности применения беспроводной технологии на частоте 868 МГц в беспроводной системе автоматического управления авиационного двигателя в ЦИАМ созданы макетные образцы беспроводных датчиков (БД) основных параметров двигателя и условий полета самолета. Результаты измерения давлений и температур в газоздушном тракте двигателя, частот вращения роторов, положения рычага управления двигателем ($\alpha_{руд}$) беспроводными датчиками САУ передавались по радиоканалу на частоте 868 МГц в центральный радиомодуль (ЦРМ), подключенный к цифровому регулятору двигателя. Исследовалась работоспособность беспроводного информационного канала САУ в условиях, соответствующих эксплуатации на двигателе. Например, оценивалось влияние экранирующего действия конструкции самолета и мотогондолы на передачу данных между БД, размещенном в мотогондole на двигателе, и ЦРМ в фюзеляже самолета (рис. 6).

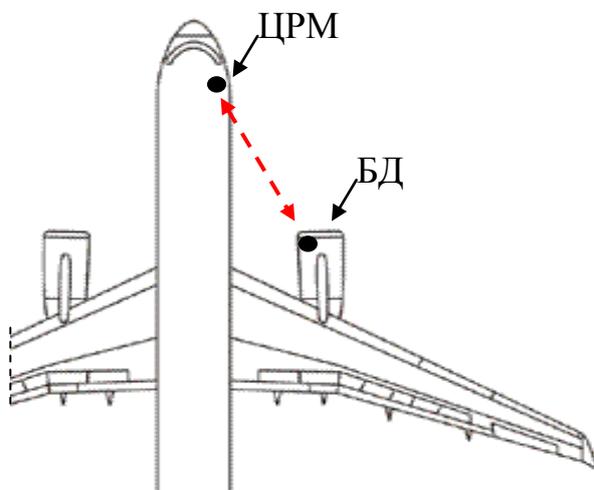


Рис. 6. Размещения БД и ЦРМ на самолете

На лабораторном комплексе экранирующие свойства фюзеляжа имитировались замкнутой металлической конструкцией, имеющей радиопрозрачные отверстия различной формы, а мотогондола – полый металлической конструкцией цилиндрической формы в одном случае с открытыми основаниями, а в другом основания были закрыты экранирующей тканью типа «Восход». Исследовались следующие варианты экранирования конструкции фюзеляжа и двигателя на работу информационного канала связи между БД и ЦРМ. Вариант 1 (прямая видимость между ЦРМ и БД) – фюзеляж и мотогондола обладают низкими экранирующими возможностями. Вариант 2 – металлический фюзеляж с радиопрозрачными лючками (окнами) и радиопрозрачная мотогондола. Вариант 3 – металлический фюзеляж с радиопрозрачными лючками (окнами) и мотогондола – металлическая конструкция цилиндрической формы с открытыми основаниями. Вариант 4 – металлический фюзеляж с радиопрозрачными лючками (окнами) и мотогондола – металлическая конструкция цилиндрической формы с основаниями закрытыми экранирующей тканью. Результаты изменения уровня напряженности электрического поля, создаваемого БД, в зоне ЦРМ в зависимости от расстояния между БД и ЦРМ и вариантов экранирования фюзеляжа и двигателя приведены на рис.7.

Исследования, проведенные в условиях электромагнитной обстановки лабораторного комплекса, показали, что при 1, 2, и 3 вариантах экранирования фюзеляжа и двигателя сбои в передаче информации между ЦРМ и БД не

наблюдались на расстоянии 30 м. При варианте 4 при удалении около 13 м возникали сбои в работе беспроводного канала, а при 15 м – полная потеря связи.

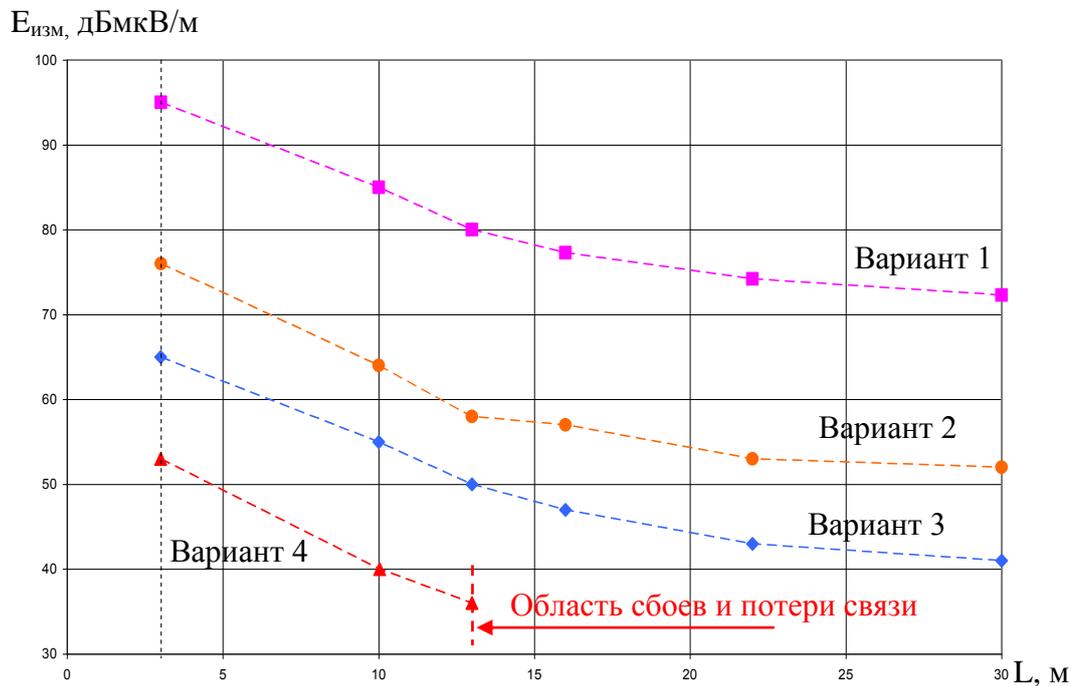


Рис. 7. Изменение уровня напряженности электрического поля в зоне ЦРМ в зависимости от расстояния между БД и ЦРМ и вариантов экранирования фюзеляжа и двигателя

Эффективным средством защиты информационного канала от сбоев и потери связи при увеличении расстояния между БД и ЦРМ может быть применение ретранслятора или увеличение мощности, излучаемой радиомодулями.

Заключение

1. Внедрение беспроводных технологий в беспроводных бортовых системах самолета и двигателя позволит:

- создать высокоэффективные системы управления, контроля и диагностики нового поколения с гибкой, легко изменяемой структурой, снизить на 20...40% массу и габариты системы за счет уменьшения количества разъемов и кабелей;

- повысить надежность (сокращение количества разъемов и реконфигурация беспроводной сети);

- снизить в 5...8 раз затраты на техническое обслуживание систем;

- упростить маршрутизацию и монтаж кабелей на борту;

- упростить модернизацию систем;

- повысить пожаробезопасность.

2. Исследования возможности применения узкополосной беспроводной передачи данных на частоте 868 МГц в беспроводной системе автоматического управления авиадвигателя, проведенные на лабораторном комплексе при различных вариантах экранирования фюзеляжем центрального радиомодуля и мотогондолой двигателя беспроводного датчика и различных расстояниях между ними, показали, что при имитации полного экранирования и расстоянии более 13 м возникали сбои в работе информационного канала, а при 15 м - полная потеря связи. Для остальных вариантов экранирования на исследуемом расстоянии до 30 м сбоев и отказов в работе беспроводного информационного канала не наблюдалось.

3. Главными проблемами применения беспроводных технологий на авиационном борту являются:

- обеспечение надежной беспроводной передачи данных с требуемым темпом и на заданное расстояние с обеспечением электромагнитной совместимости беспроводной сенсорной сети с бортовыми системами в жестких условиях работы на самолете и двигателе;

- снижение энергопотребления беспроводными электронными устройствами систем управления, контроля и диагностики технического состояния самолета и двигателя.

Библиографический список

1. Securaplane Technologies Inc.: SecuraNet™ WIRELESS TECHNOLOGY Intra-Aircraft Wireless Data Bus for Essential and Critical Applications. 2007. URL: <http://https://www.securaplane.com/>
2. Irizar A., Ruiz P. Future Challenges, roadmap for WSN and dissemination activities. Wireless Smart Distributed End System for Aircraft. 2014. URL: http://www.wildcraft-eu.org/docs/20140331_Future-Roadmap-Dissemination_D111.pdf
3. Hendrix J., Raimo J. Wireless 101: A look at a leading-edge technology // Siemens Building Technologies. Inc. 2016. URL: <http://www.slac.stanford.edu/xorg/nmtf/nmtf-tools.html>
4. Li L., Xie J., Ramahi O.M., Pecht M., Donham B. Airborne Operations of Portable Electronic Devices // IEEE Antenna's and Propagation Magazine. 2002. Vol. 44. no. 4, pp. 30-39.

5. Kayton M., Kayton Engineering Company, Santa Monica, CA. One Hundred Years of Aircraft Electronics // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2003. Vol. 26. no. 2, pp. 193-213.
6. Chilakala S. Development and Flight Testing of a Wireless Avionics Network Based on the IEEE 802.11 Protocols. 2008. URL: https://kuscholarworks.ku.edu/bitstream/handle/1808/4005/umi-ku-2397_1.pdf
7. Удодов А.Н., Анализ возможностей построения энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей для мониторинга работы двигателей // Труды МАИ. 2014. no. 74. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49034>
8. Харада Р. Сравнение беспроводных технологий // Журнал сетевых решений/LAN. 2007. no. 5. URL: <https://www.osp.ru/lan/2007/05/4194508>