

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НАТУРНО-МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОЛОКАЦИИ И НАВИГАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. О. В. Болховская^{a,c,*}, А. В. Елохин^{a,c}, А. О. Кокарев^{a,c}, В. С. Сергеев^{a,c},
И. С. Сорокин^{a,b}, А. А. Спиринов^b, А. А. Мальцев^a

^a Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

^b ООО НПП «Авиаком»
Россия, 603032, Нижний Новгород, ул. Баумана, 173

^c ООО «Радио Лаб НН»
Россия, 603022, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23-1, 208

*e-mail: obol@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 02.12.2020 г.

После доработки 18.01.2021 г.

Принята к публикации 19.01.2021 г.

Описаны результаты разработки и приведены основные технические характеристики программно-аппаратного комплекса (п.а.к.), предназначенного для проектирования и натурно-модельных испытаний широкополосных радиоэлектронных систем (р.э.с.) радиосвязи, радиолокации и навигации высокоскоростных объектов. Программно-аппаратный комплекс обеспечивает: генерацию и обработку сигналов с несущей частотой до 6 ГГц и шириной полосы до 200 МГц, частоту обновления импульсной переходной характеристики канала до 60 кГц, максимальную задержку лучей в моделях радиоканала до 10 мкс. Комплекс позволяет исследовать системы радиосвязи с объектами, движущимися с относительной разностью скоростей до 5 М.

Программная часть комплекса включает в себя модели процессов формирования и обработки сигналов в приемно-передающей аппаратуре р.э.с., а также модели радиоканалов для целевых сценариев использования разрабатываемых систем. Аппаратная часть п.а.к. представляет собой набор цифровых, цифроаналоговых и аналого-цифровых модулей и позволяет проводить тестирование и натурно-модельные испытания р.э.с. и их блоков в реальном времени. Приведены примеры исследования характеристик современной широкополосной авиационной системы радиосвязи с высокоскоростными объектами в условиях многолучевого распространения сигналов. Применение п.а.к. позволяет примерно в 65 раз сократить время проведения натурно-модельных испытаний р.э.с. по сравнению с прямым компьютерным моделированием.

DOI: 10.31857/S0032816221030277

ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиоэлектронной техники и технологий достигло в настоящее время такого уровня, что применение стандартных методов компьютерного моделирования при проектировании новых радиоэлектронных систем (р.э.с.) оказывается недостаточным по трем основным причинам:

– во-первых, компьютерное моделирование сложных р.э.с. на физическом и системном уровнях требует больших вычислительных мощностей и занимает достаточно много времени, даже при использовании суперкомпьютеров;

– во-вторых, при компьютерном моделировании приемно-передающих устройств и каналов

связи используется целый ряд приближений, которые часто приводят к несоответствию результатов моделирования результатам натурных экспериментальных измерений характеристик проектируемых образцов (прототипов);

– в-третьих, проведение натурных экспериментальных измерений характеристик сложных р.э.с. при различных сценариях развертывания для высокоскоростных объектов требует больших организационных, финансовых и временных затрат.

Все перечисленные факторы приводят к существенному увеличению времени проектирования и стоимости разработки новых р.э.с., поскольку



Рис. 1. Блок-схема п.а.к. для проведения натурно-модельных испытаний разрабатываемого приемно-передающего оборудования. *ТХ* – передатчик, *РХ* – приемник.

после проведения дорогостоящих натурных испытаний опытные образцы приемно-передающих устройств, как правило, приходится возвращать на доработку.

Один из подходов к решению обозначенных проблем основан на применении программно-аппаратных комплексов, которые позволяют исследовать характеристики разрабатываемых р.э.с. и заменять натурные испытания опытных образцов оборудования их натурно-модельными испытаниями с использованием цифровых эмуляторов каналов связи [1, 2]. Последние позволяют имитировать с высокой точностью распространение сигналов в сложных линиях радиосвязи и измерять характеристики опытных образцов или уже выпускаемых продуктов в реальном времени. Такой программно-аппаратный комплекс (п.а.к.) для проектирования и натурно-модельных испытаний широкополосных систем радиосвязи, радиолокации и навигации высокоскоростных объектов был разработан авторами данной работы.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ БЛОК-СХЕМЫ П.А.К.

Конструктивно базовый комплект п.а.к. состоит из двух блоков: основного программного блока, реализованного на персональном компьютере (п.к.), и каналообразующего блока, реализованного программно-аппаратно. При проектировании к п.а.к. подключаются программно-аппаратные модели передатчика *ТХ* и приемника *РХ*, разрабатываемые заказчиком, или непосредственно опытные образцы (прототипы) (рис. 1).

Основной программный блок на п.к. содержит:

- программные модели сценариев развертывания исследуемой р.э.с. и каналов связи, параметры окружающей среды, географическое положение объектов и параметры приемно-передающего оборудования;
- конфигурационный модуль, задающий параметры алгоритмов обработки сигналов в испытываемых приемно-передающих устройствах и параметры эмулятора среды распространения в соответствии с выбранным сценарием;
- модуль для измерения и хранения метрик, характеризующих работу р.э.с. в процессе моделирования или натурно-модельных испытаний (пропускная способность и уровни ошибок для систем радиосвязи, кривые обнаружения для радиолокационных систем, координаты объекта для систем навигации и т.п.);
- графический интерфейс пользователя, отображающий информацию на п.к. и позволяющий представлять результаты измерения характеристик р.э.с. в удобном для пользователя виде.

Каналообразующий блок содержит:

- аппаратную часть, реализованную на доступных интегральных микросхемах: аналого-цифровой приемный модуль с входом от передающего устройства на радио- или промежуточной частоте, включающий в себя малошумящий усилитель НМС8410, демодулятор ADL5380 и квадратурный аналого-цифровой преобразователь с частотой взятия выборок 1.2 ГГц; цифровой модуль эмулятора среды распространения, реализо-

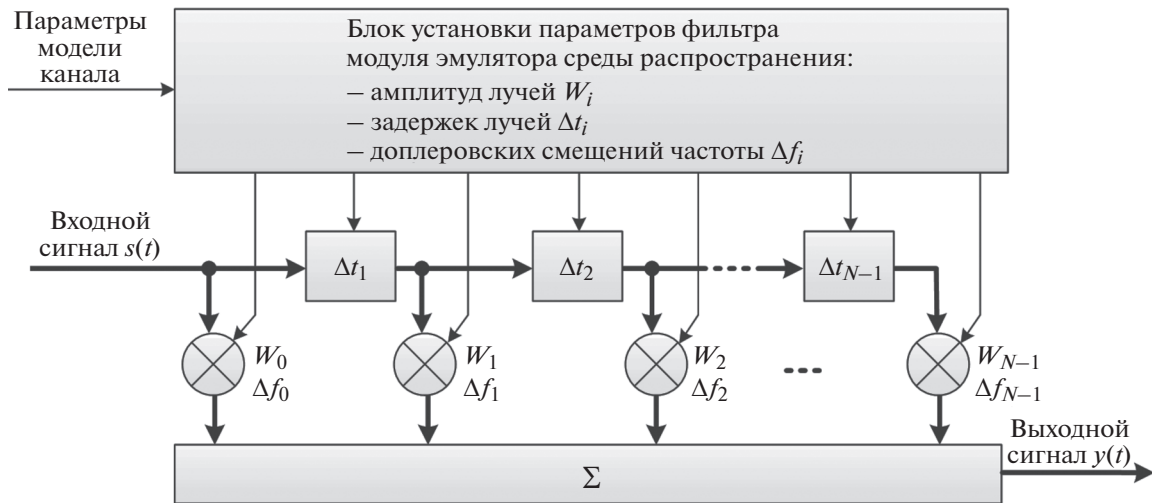


Рис. 2. Блок-схема универсального трансверсального фильтра с изменяемыми параметрами модуля эмулятора среды распространения п.а.к.

ванный на программируемой логической интегральной схеме (п.л.и.с.) ХСКУ060-1FFVA11561, моделирующей распространение сигнала в реальном времени для заданной модели канала, и цифроаналоговый передающий модуль с выходным сигналом на радио- или промежуточной частоте, включающий в себя квадратурный цифроаналоговый преобразователь DAC38J82, модулятор ADL5375;

– программно-аппаратную модель канала радиосвязи, загружаемую в п.л.и.с. модуля эмулятора среды распространения из конфигурационного модуля основного программного блока на п.к. и позволяющую моделировать многолучевое распространение сигналов, эффект Доплера, пространственное затухание сигналов, внешние помехи и т.п.

Разработанный п.а.к. обладает гибкой архитектурой и широким функционалом для создания реалистичных 3D-моделей каналов связи, соответствующих сценариям развертывания разрабатываемых или производимых р.э.с. Это позволяет использовать технологию программно-определяемого радио (SDR, Software Defined Radio) для создания в короткие сроки адекватных “цифровых двойников” приемно-передающих устройств, проводить отладку отдельных блоков новых р.э.с. и натурно-модельные испытания разработанных прототипов приемников и передатчиков.

БЛОК МОДУЛЯ ЭМУЛЯТОРА СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Возможность моделирования эффектов многолучевого распространения с применением их к передаваемым радиосигналам в реальном времени обеспечивается аппаратно реализованным в

цифровом модуле эмулятора среды распространения универсальным трансверсальным фильтром с изменяемыми параметрами (рис. 2).

Трансверсальный фильтр реализует задаваемую сценарием импульсную переходную характеристику многолучевого канала связи с N лучами и осуществляет ее свертку с передаваемым радиосигналом в реальном времени. В число параметров фильтра входит набор комплексных амплитуд лучей, задаваемых весовыми коэффициентами W_i ($i = \overline{0, N-1}$) в отводах фильтра, набор временных задержек лучей Δt_i ($i = \overline{1, N-1}$), а также набор доплеровских смещений частоты сигнала отдельно для каждого из лучей Δf_i ($i = \overline{0, N-1}$), реализуемых путем динамического задания соответствующих фазовых набегов.

Аппаратная реализация трансверсального фильтра на п.л.и.с. позволяет моделировать сложные многолучевые нестационарные каналы связи с максимальным числом лучей $N = 14$, максимальной общей задержкой лучей до 10 мкс ($\sum_{i=\overline{1, N-1}} \Delta t_i \leq \leq 10$ мкс) и доплеровскими сдвигами частоты до ± 30 кГц ($|\Delta f_i| \leq 30$ кГц). При этом весовые коэффициенты W_i и другие параметры фильтра могут обновляться с частотой до 60 кГц.

Значения параметров трансверсального фильтра и законы их изменения во времени задаются в конфигурационном модуле основного программного блока на п.к., исходя из требуемого сценария и принятой модели радиоканала, и загружаются в п.л.и.с. модуля эмулятора среды распространения при проведении каждой серии испытаний.

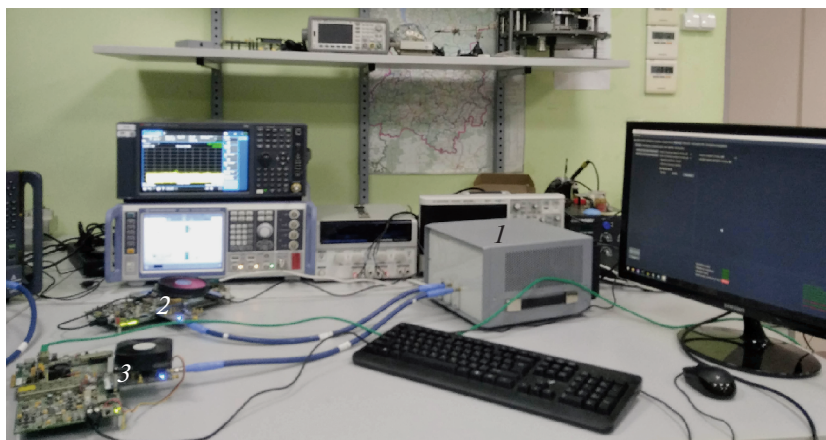


Рис. 3. Общий вид программно-аппаратного комплекса при испытаниях прототипов приемно-передающей аппаратуры системы высокоскоростной передачи данных для авиационной радиосвязи. 1 – аппаратная часть п.а.к., 2 – прототип передатчика, 3 – прототип приемника.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ П.А.К.

В п.а.к. предусмотрена возможность задания параметров собственных сценариев развертывания р.э.с. в основном программном блоке на п.к. и измерения характеристик р.э.с. на физическом и системном уровнях в реальном времени с использованием п.а.к. в качестве “ускорителя” для моделирования 3D-каналов связи.

Программно-аппаратный комплекс позволяет формировать и принимать радиосигналы с несущей частотой до 6 ГГц, генерировать и обрабатывать сигналы на видеочастоте с шириной полосы до 200 МГц. При моделировании нестационарных каналов радиосвязи п.а.к. обеспечивает частоту обновления импульсной переходной характеристики канала в эмуляторе среды распространения до 60 кГц. Это позволяет при исследовании систем радиосвязи с объектами, движущимися с относительной разностью скоростей до 5 М, делать порядка двух обновлений коэффициентов импульсной передаточной характеристики многолучевой модели канала на одном периоде максимального доплеровского смещения.

На рис. 3 показан общий вид разработанного п.а.к., используемого для испытания прототипов новых передающих и приемных устройств для авиационной радиосвязи, предоставленных индустриальным партнером НПП “ПРИМА”, ведущим производителем аппаратуры беспроводной связи в России [3].

Для управления функционалом п.а.к. был разработан удобный графический интерфейс пользователя, который позволяет задавать параметры сценариев развертывания р.э.с., управлять параметрами различных модулей п.а.к., используемых сигналов и моделей каналов связи. Графический интерфейс также позволяет выводить на экран

монитора результаты моделирования как в графическом виде, так и в виде файлов, которые могут быть использованы для более детальной обработки результатов моделирования в сторонних программных продуктах.

Пример визуализации результатов испытаний авиационной системы связи “земля–воздух” для сценария полета над холмистой поверхностью приведен на рис. 4. В качестве входных данных, задаваемых в левом окне экрана, используются положение летательного аппарата в пространстве, поляризация и 3D-диаграммы направленности антенн, параметры системы связи (несущая частота, полоса частот сигнала, частота дискретизации, вид модуляции, скорость кодирования и т.д.). Результаты моделирования в данном примере представлены зависимостями вероятностей битовых ошибок от отношения сигнал/шум для разных сигнально-кодовых конструкций и приведены в правом окне экрана.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ П.А.К. ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ГИГАЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Разработанный п.а.к. был использован при проектировании и проведении натурно-модельных испытаний высокоскоростных терминалов передачи данных для новой авиационной системы связи гигагерцового диапазона длин волн (3–6 ГГц). Исследуемая система представляла собой широкополосную OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) систему связи, в которой для модулирования поднесущих использовались следующие виды модуляции: BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Основные параметры разработанной системы связи приведены в табл. 1.

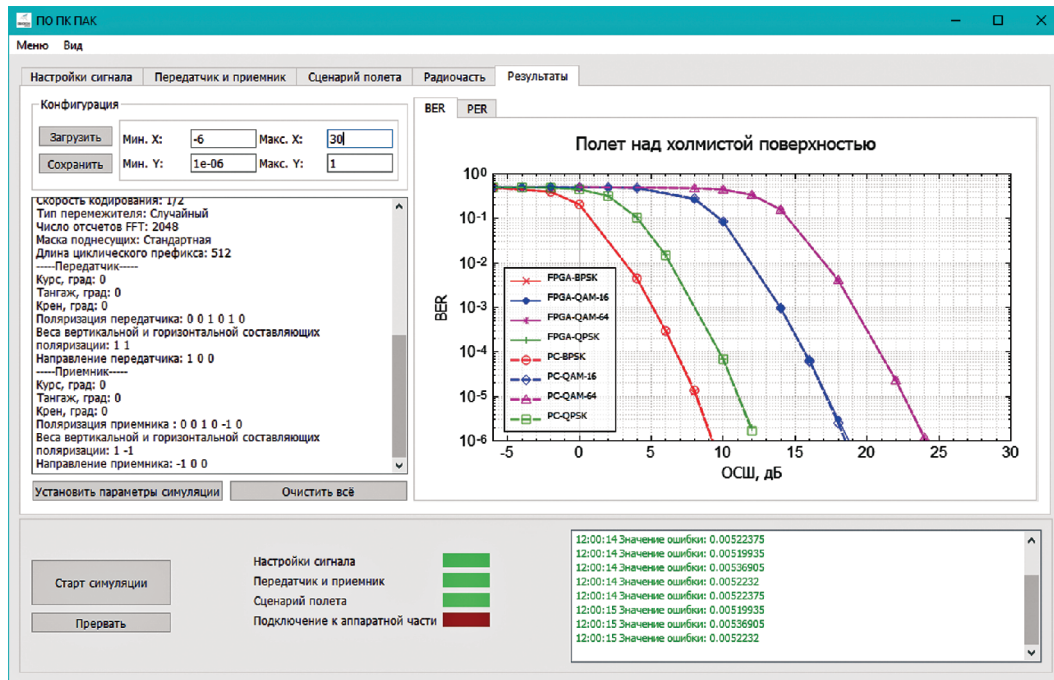


Рис. 4. Вид экрана графического интерфейса пользователя п.а.к. при испытании авиационной системы связи “земля–воздух”.

В соответствии с предложенным промышленным партнером перечнем сценариев развертывания широкополосной авиационной системы радиосвязи были разработаны 11 моделей среды распространения сигналов с учетом конкретизирующих параметров сценариев развертывания и параметров приемно-передающих устройств.

Первоначально были реализованы 4 тестовые модели на основе результатов работ [4, 5]. Эти упрощенные модели не учитывали возможные разнообразные сценарии и условия полета, а также угловые характеристики многолучевого кана-

ла связи и диаграммы направленности используемых антенных систем. Поэтому было принято решение воспользоваться результатами экспериментальных исследований характеристик авиационных каналов “земля–воздух”, выполненных в исследовательском центре NASA (США) и опубликованных в 2017 г. в серии статей [6–8]. Схема проводимых в этих работах экспериментальных измерений показана на рис. 5.

10-ваттный передатчик T_X был установлен на вышке наземной станции высотой $h_{TX} = 20$ м над землей, в то время как приемник R_X размещен на

Таблица 1. Параметры авиационной OFDM-системы связи

Параметр	Значение параметра
Несущая частота f_0 , ГГц	3–6
Ширина полосы сигнала ΔF , МГц	200
Число поднесущих в OFDM-символе	2048
Расстояние между поднесущими Δf , кГц	97.66
Число отсчетов в OFDM-символе	2048
Число отсчетов в защитном интервале	512
Длительность OFDM-символа T_{syms} , мкс	10.24
Длительность защитного интервала T_{GI} , мкс	2.56
Число OFDM-символов в одном пакете	3
Длина пакета сигнала T_{packet} , мкс	38.4
Тип помехоустойчивого кодирования	Сверточный код IEEE802.11a, скорости кодирования 1/2, 2/3, 3/4

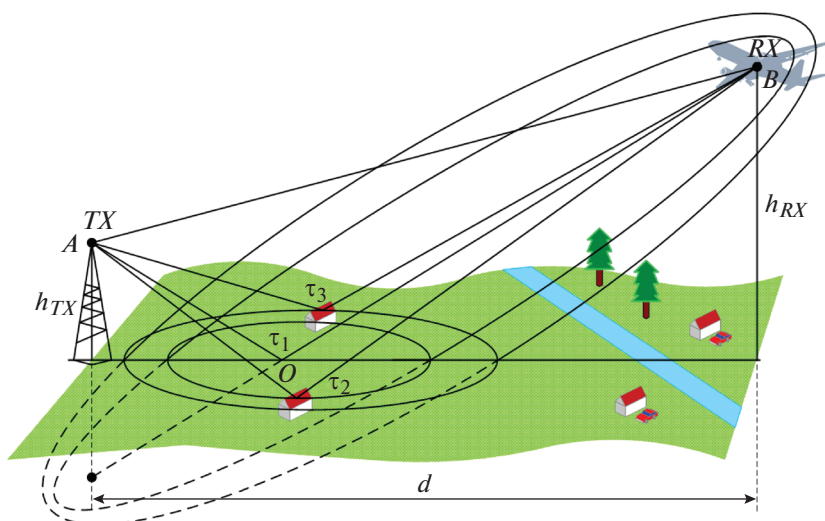


Рис. 5. Схема экспериментальных измерений характеристик канала связи “земля–воздух”, проводимых в работах [6–8], и структура выявленных лучей распространения сигнала. *TX* – передатчик, *RX* – приемник.

самолете, летящем на высоте h_{RX} от 800 до 1200 м на удалении d от 2 до 50 км от наземной станции. Измерения проводились для разных сценариев полетов в двух частотных диапазонах: 960–977 МГц и 5030–5091 МГц, выделенных в США для беспилотных летательных аппаратов [6].

Проведенные в [6–8] детальные экспериментальные исследования показали, что для всех рассмотренных сценариев полетов канал “земля–воздух” может быть адекватно описан с помощью многолучевой модели, включающей в себя два всегда присутствующих детерминистских луча (прямой луч AB и луч AOB , отраженный от подстилающей поверхности и западающий относительно прямого луча на τ_1 (см. рис. 5)) и набор случайных лучей (от одного до семи), отраженных от различных наземных объектов. Параметры детерминистских лучей рассчитывают исходя из геометрии сценария, свойств подстилающей поверхности и результатов экспериментов. Параметры случайных лучей: вероятность появления, время жизни, амплитуда, задержка относительно прямого луча (τ_2 , τ_3 и т.д.) – задаются с помощью эмпирических распределений, определенных в [6–8] путем многочисленных прямых измерений.

На основе этих базовых экспериментальных результатов и геометрических моделей сценариев полетов в работе [9] был разработан метод реконструкции угловых и частотных характеристик канала. Это позволило реализовать высокоадекватные 3D-модели авиационных каналов “земля–воздух”, позволяющие детально описывать пространственные, временные, угловые и частотные характеристики канала для различных сценариев полета (полет над водной поверхностью, над холмистой местностью, над городской и пригород-

ной застройками и т.д.) и исследовать системы связи с направленными и многоэлементными антенными системами.

Разработанные модели каналов связи были реализованы на языках программирования высокого уровня (Matlab, C++), а затем имплементированы в п.л.и.с. аппаратной части модуля эмулятора среды распространения п.а.к. (см. рис. 2). Поскольку параметры всех моделей каналов связи, реализованных в п.а.к., задавались на основе эмпирических распределений, определенных в работах [6–8], то результаты моделирования полностью соответствуют результатам реальных натурных испытаний.

Сравнительная оценка скорости моделирования исследуемой авиационной системы связи на п.к. и п.а.к. была проведена путем расчета времени “прохождения” одного пакета данных, состоящего из трех OFDM-символов, через нестационарный многолучевой канал с учетом эффекта Доплера. При моделировании на п.к. в среде Matlab с использованием операции взятия свертки во времени процесс обработки одного пакета занимал приблизительно 2.5 мс. При использовании п.а.к. генерируемый передатчиком сигнал проходил через эмулятор среды распространения в реальном времени, что занимало 38.4 мкс. Таким образом, применение п.а.к. позволяло ускорить время проведения испытаний приблизительно в 65 раз.

Измерения характеристик новой авиационной системы связи гигагерцового диапазона длин волн проводились на разработанном п.а.к. для нескольких сценариев развертывания, существенно отличающихся условиями распространения радиоволн. При этом было исследовано вли-

яние подстилающей поверхности, высоты и скорости движения приемника и передатчика, диаграмм направленности антенных систем, погодных условий и т.д. на пропускную способность системы связи. В качестве основных метрик использовались скорость передачи данных, вероятности битовых и пакетных ошибок в зависимости от дальности связи, отношения сигнал/шум и других параметров.

Пример измеренных зависимостей вероятностей битовых ошибок от отношения сигнал/шум для сценария полета над холмистой поверхностью приведен на панели графического интерфейса (см. рис. 3). Интересно отметить, что для получения результатов, представленных на рис. 3, с использованием п.а.к. потребовалось всего около 3 мин 6 с, тогда как при моделировании на п.к. — 3 ч 22 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан программно-аппаратный комплекс, предназначенный для проектирования и натурно-модельных испытаний приемно-передающего оборудования широкополосных радиоэлектронных систем радиосвязи, радиолокации и навигации различного назначения с учетом особенностей многолучевого распространения сигналов в физических каналах связи, типов используемых сигналов и передаваемой информации.

Созданная технология проектирования позволяет существенно ускорить проведение натурно-модельных испытаний прототипов новых передающих и приемных устройств с несущей частотой до 6 ГГц и полосой до 200 МГц и исследовать характеристики авиационных систем связи в сложных многолучевых нестационарных каналах с высокоскоростными объектами, движущимися с разностью скоростей до 5 М.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность руководству НПП “Авиаком” и НПП “Прима” за помощь в реализации данного проекта.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в НПП “Авиаком” и ННГУ им. Н.И. Лобачевского при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям), договор 398 ГР/44372, и индустриального партнера НПП “Прима”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maltsev A.A., Khoryaev A., Lomayev A., Maslennikov R., Antonopoulos C., Avgeropoulos K., Alexiou A., Boccardi F., Yun Hou, Kin K. Leung* // IEEE Communications Magazine. 2010. V. 48. № 3. P. 172. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5434390>
2. Keysight. Тестирование систем аэрокосмической, спутниковой и бортовой радиосвязи с помощью эмуляции каналов средствами Prosim. <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-05279/brochures/5992-1606.pdf>
3. <http://prima-systems.ru/>
4. *Haas E.* // IEEE Transactions on vehicular technology. 2002. V. 51. № 2. P. 254. <https://doi.org/10.1109/25.994803>
5. *Исмаилов А.В.* // Вестник ЯрГУ. Серия Естественные и технические науки. 2012. № 3. С. 56.
6. *Matolak D.W., Sun R.* // IEEE Trans. Veh. Technol. 2017. V. 66. № 1. P. 26. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2530306>
7. *Sun R., Matolak D.W.* // IEEE Trans. Veh. Technol. 2017. V. 66. № 3. P. 1913. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2585504>
8. *Matolak D.W., Sun R.* // IEEE Trans. Veh. Technol. 2017. V. 66. № 8. P. 6607. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2659651>
9. *Maltsev A.A., Bolkhovskaya O.V., Sergeev V.S., Elokhin A.V., Kokarev A.O.* // 3D Air-Ground Channel Model Reconstruction Based on the Experimental Data and Q-D Method. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Machine Learning and Artificial Intelligence.* 2020. V. 332. P. 337. <https://doi.org/10.3233/FAIA200799>