

УДК 621.396.6:621.391.82

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА СИСТЕМОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ

В.И. МОРДАЧЕВ, Е.В. СИНЬКЕВИЧ, Д.А. ЦИОНЕНКО, А.С. СВИСТУНОВ, И.В. ШАКИНКО,
А.В. АХРАМОВИЧ, С.О. КУЛИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: emc@bsuir.by

Аннотация. Представлено описание технологий и средств системного анализа и обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и электромагнитной защиты (ЭМЗ) в сложных локальных бортовых и наземных группировках радиоэлектронных средств (РЭС) и территориальных группировках радиосистем, разработанных научно-исследовательской лабораторией ЭМС РЭС БГУИР. Обоснованы преимущества и практическая ценность представленных технологий и средств анализа ЭМС и ЭМЗ.

Abstract. This paper describes the technologies and tools for analyzing and ensuring electromagnetic compatibility (EMC) and electromagnetic protection (EMP) in complex local airborne, shipborne, and ground-based electronic systems and terrestrial distributed radio system groups at system level. These technologies and tools were developed by the EMC R&D Laboratory of BSUIR. The advantages and practical value of the described EMC & EMP analysis technologies and tools are substantiated.

Введение

Эффективность совместного использования множества технических средств (ТС) различного назначения, образующих сложные бортовые комплексы либо функционирующих в составе сложных наземных объектов, включая объекты критической инфраструктуры, а также формирующие сложные пространственно-распределенные группировки радиосистем различных радиослужб, в значительной мере определяется их электромагнитной совместимостью (ЭМС) и защищенностью от внешних радиочастотных электромагнитных воздействий.

Системный анализ ЭМС и электромагнитной защиты (ЭМЗ) ТС в образуемых ими бортовых и наземных группировках является важнейшей и неотъемлемой частью проектирования и обеспечения нормальной эксплуатации этих группировок, позволяющий своевременно обнаружить и устранить потенциально опасные паразитные электромагнитные (ЭМ) связи между входящими в них ТС и нежелательное воздействие внешних источников радиочастотных ЭМ полей (ЭМП) на элементы этих группировок. Технологии такого анализа существенно зависят

– от вида ТС, образующих группировку (радиоэлектронные средства (РЭС), функционирование которых связано с использованием ЭМП для передачи и извлечения информации; высокочастотные устройства (ВЧУ), функционирование которых связано с использованием ЭМП для реализации различных технологических процессов; ТС, функционирование которых обеспечивается их электропитанием и не связано с излучением или приемом ЭМП);

– от вида пространственного группирования ТС (концентрация ТС на малоразмерных объектах, различные виды распределения ТС в пространстве) и связанного с ним характера распространения ЭМП между ТС-источниками и ТС-рецепторами ЭМП;

– от характера решаемой задачи (определение ЭМС ТС в группировке; определение необходимых мер ЭМЗ ТС от внутрисистемных и межсистемных ЭМ воздействий; определение уровня ЭМ безопасности объектов критической инфраструктуры и населения, включая оценку ЭМ экологии – определение уровня ЭМ загрязнения внешней среды [0 – с. 6], и т.п.).

Методы и специализированные средства компьютерного моделирования для анализа и диагностики ЭМС в группировках ТС позволяет автоматизировать не только выявление потенциально опасных ЭМ связей между элементами этих группировок, но и подбор адекватных защитных решений с проверкой их эффективности, что существенно уменьшает либо полностью исключает потери, связанные с ограничением

функциональности и снижением эффективности функционирования этих группировок в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО), обусловленной воздействием внутрисистемных и межсистемных помех различного происхождения.

Ниже приводится описание технологий и средств, разработанных в научно-исследовательской лаборатории ЭМС РЭС БГУИР и обеспечивающих широкие возможности системного анализа ЭМС и ЭМЗ в группировках ТС различного типа.

Системный анализ ЭМС и ЭМЗ в локальных группировках ТС

Принципиальные особенности и требования к решению задач ЭМС в бортовых (корабль, самолет, автомобиль и т.п.) и наземных (аэропорт, морской порт, логистический узел и т.п.) локальных группировках (ЛГ) ТС состоят в следующем [0]:

а) в наличии в бортовых ЛГ ТС большого числа паразитных ЭМ связей различных с точки зрения технологии анализа: «Антенна – антенна», «Внешнее ЭМП – антенна», «Антенна – провод (кабель)», «Антенна – корпус оборудования», «Провод – провод», «Внешнее ЭМП – провод» и т.п., способных проявляться в очень широком диапазоне частот;

б) в потенциальной опасности и, соответственно, необходимости учета возможности одновременного воздействия в бортовой ЛГ ЭМ помех по различным портам ТС: сигнальным, управления, коммутации, питания и т.п., что требует использования специализированных критериев оценки степени поражения ТС помехами и одновременного анализа большого числа паразитных ЭМ связей, а также их моделей высокой вычислительной эффективности;

с) в ориентации на пессимистические оценки ЭМС, допускающие ошибки 1 рода ("ложная тревога"), но исключая ошибки 2 рода ("ошибочное необнаружение потенциально опасной ЭМ связи"). Цена ошибок 2 рода многократно выше, поскольку их приходится устранять на последующих этапах жизненного цикла ЛГ, либо мириться с ограничением работоспособности и ухудшением характеристик элементов ЛГ из-за присутствия помех в реальных условиях эксплуатации. Это требует использования для моделирования паразитных ЭМ связей моделей наихудшего случая (worst-case models);

д) в необходимости обеспечения практических возможностей и вариантов устранения опасности мешающего влияния ЭМП на работоспособность ТС ЛГ по результатам системного анализа их ЭМС.

Эффективными средствами, обеспечивающими решение задач анализа ЭМС и обоснования вариантов ее обеспечения в ЛГ ТС, а также анализа возможного поражения оборудования бортовых ЛГ внешними ЭМП различных видов и определения возможных вариантов защиты оборудования ЛГ от этих воздействий, являются специализированные экспертные системы (ЭС) "EMC-Analyzer" [0], [0] и "E3-Analyzer" [0].

Идеология ЭС "EMC Analyzer" основана на принципах, сформированных в рамках научно-технической программы IEMCAP [0]. Она реализована с использованием оригинальных технологий дискретного линейного (ДЛА) и нелинейного (ДНА) анализа ЭМС и обеспечивает следующие возможности:

– линейный анализ внутрисистемной и межсистемной ЭМС, включая определение наличия, источников и путей распространения линейных помех и расчет их интенсивности;

– расчет необходимых изменений характеристик оборудования для достижения ЭМС, включая генерацию технических спецификаций;

– линейный анализ интенсивности ЭМП, включая расчет распределения ЭМП на ограниченных участках территории или акватории;

– нелинейный анализ ЭМС, включая определение наличия нелинейных радиопомех (интермодуляции, блокирования, перекрестной модуляции, преобразования шумов гетеродинов) в радиоприемниках ЛГ и расчет их интенсивности;

– идентификация источников нелинейных радиопомех как из числа радиопередатчиков ЛГ, так и из числа ЭМП внешней ЭМО.

ЭС "EMC-Analyzer" используется при разработке и модернизации сложных бортовых и наземных ЛГ ТС, при поиске и устранении в них помех, при анализе функционирования ЛГ и его оборудования в сложной ЭМО; при анализе ЭМО, создаваемой оборудованием ЛГ за ее пределами с учетом ЭМП соседних ЛГ; при обеспечении ЭМС размещаемых в ЛГ новых ТС. Примеры моделей бортовых и наземных ЛГ, анализируемых в ЭС "EMC Analyzer" приведены на рис. 1.

Идеология ЭС “Е3-Analyzer” основана на использовании пессимистических полуаналитических моделей ЭМ паразитных связей, спектров излучений источников и характеристик восприимчивости рецепторов помех, что обеспечивает возможность анализа ЭМС при ограниченном объеме исходных данных и в широком диапазоне частот (от 25 Гц до 40 ГГц в рамках одной модели), а также уменьшение требований к вычислительным ресурсам и отсутствие необходимости моделирования множества вариантов для нахождения наихудшего случая. Реализуемое в ЭС “Е3-Analyzer” моделирование путей воздействия ЭМП упрощает анализ механизма возникновения помех и разработку мер защиты оборудования бортовой системы от помех. Для оптимизации выбора мер защиты, в ЭС “Е3-Analyzer” предусмотрена база данных, содержащая параметры, регламентированные производителем конкретных изделий, используемых в качестве защитных решений (фильтры, изделия для ЭМ экранирования и поглощающие материалы). Разработанный алгоритм подбора защитных решений позволяет обеспечить требуемый уровень защиты ТС ЛГ от внешних электромагнитных воздействий при оптимальном соотношении «цена-качество». Пример моделирования бортовой ЛГ самолета и пути воздействия внешнего ЭМП на его оборудование в ЭС “Е3-Analyzer” представлен на рис. 2.

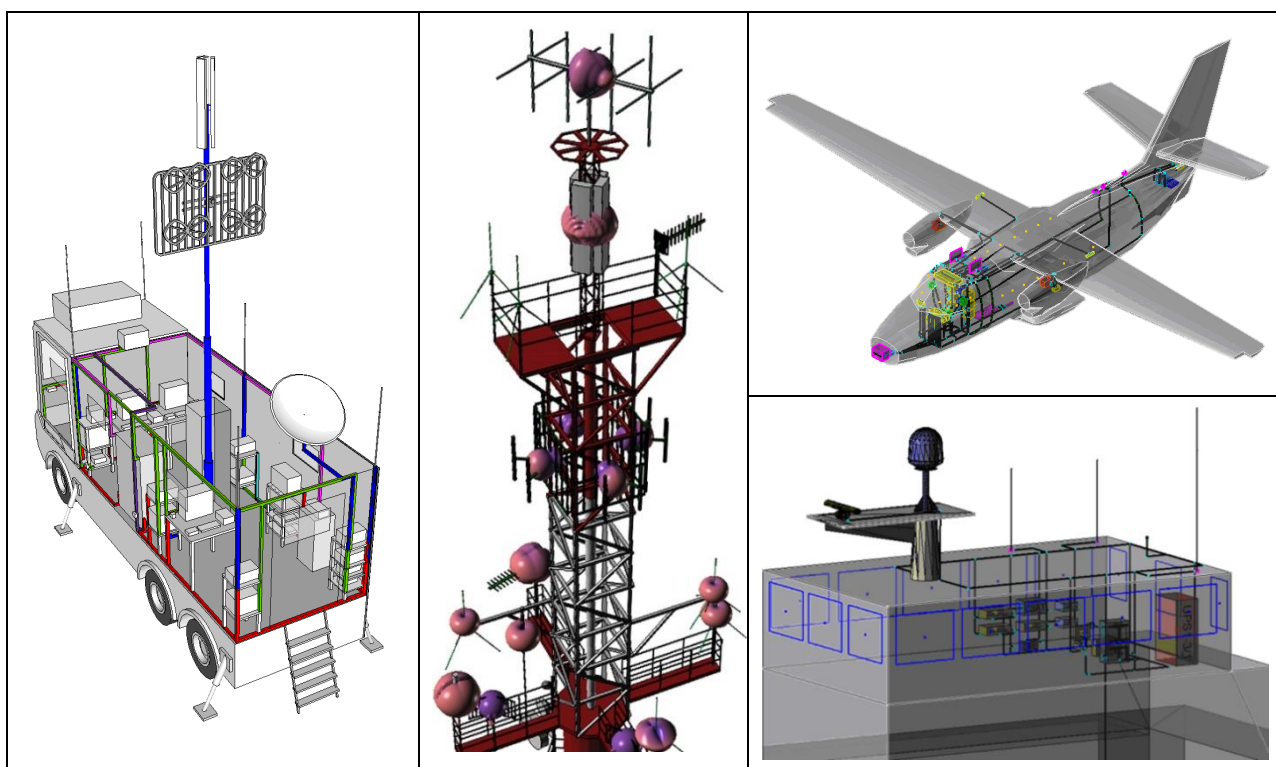


Рис. 1. Примеры 3D-моделей бортовых ЛГ (автомобиль, антенная мачта, самолет, рубка корабля) в ЭС “ЕМС-Analyzer”

Идеология ЭС “Е3-Analyzer” основана на использовании пессимистических полуаналитических моделей ЭМ паразитных связей, спектров излучений источников и характеристик восприимчивости рецепторов помех, что обеспечивает возможность анализа ЭМС при ограниченном объеме исходных данных и в широком диапазоне частот (от 25 Гц до 40 ГГц в рамках одной модели), а также уменьшение требований к вычислительным ресурсам и отсутствие необходимости моделирования множества вариантов для нахождения наихудшего случая. Реализуемое в ЭС “Е3-Analyzer” моделирование путей воздействия ЭМП упрощает анализ механизма возникновения помех и разработку мер защиты оборудования бортовой системы от помех. Для оптимизации выбора мер защиты, в ЭС “Е3-Analyzer” предусмотрена база данных, содержащая параметры, регламентированные производителем конкретных изделий, используемых в качестве защитных решений (фильтры, изделия для ЭМ экранирования и поглощающие материалы). Разработанный алгоритм подбора защитных решений позволяет обеспечить требуемый уровень защиты ТС ЛГ от внешних электромагнитных воздействий при оптимальном соотношении «цена-качество». Пример моделирования бортовой ЛГ самолета и пути воздействия внешнего ЭМП на его оборудование в ЭС “Е3-Analyzer” представлен на рис. 2.

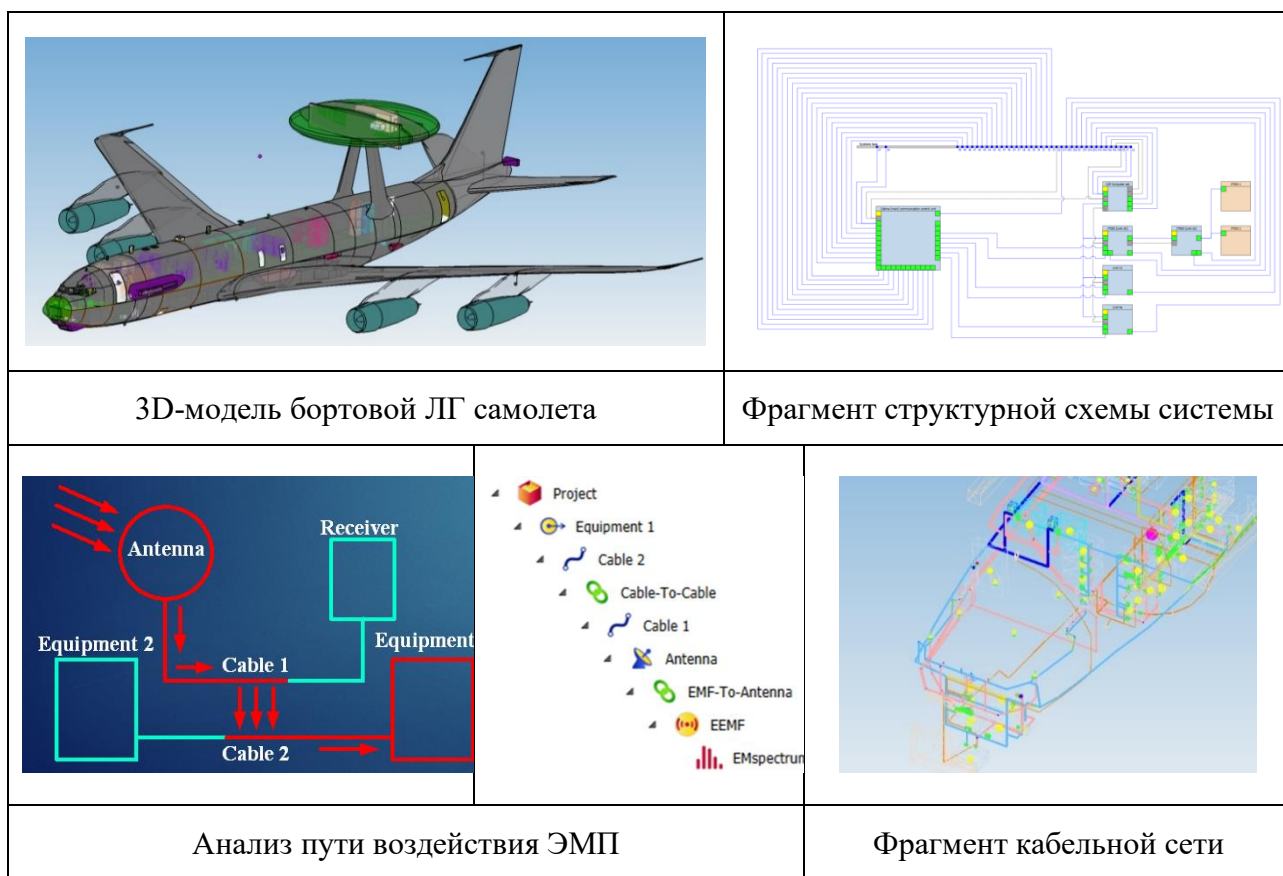


Рис. 2. Пример моделирования бортовой ЛГ самолета и пути воздействия внешнего ЭМП на его оборудование в ЭС “Е3-Analyzer”

Системный анализ ЭМС в рассредоточенных группировках РЭС

Анализ ЭМС радиосистем различных служб в сложных территориальных группировках, учитывающий влияние рельефа и морфологии земной поверхности, а также характеристик атмосферы на распространение радиоволн (РРВ) от источников к рецепторам помех является необходимой процедурой анализа эффективности функционирования этих группировок. Этот анализ в полигонных условиях малоэффективен в силу его высокой стоимости, относительно небольшого количества анализируемых сценариев и возможностей внешнего радиомониторинга совместного функционирования радиосистем в анализируемой группировке.

Эти недостатки и ограничения могут быть преодолены применением при анализе и обеспечении ЭМС в больших территориальных группировках радиосистем технологий и средств виртуального полигона (Virtual Testing Area – VTA) [0].

Технология VTA – это технология дополненной реальности для полунатурного моделирования, анализа и обеспечения ЭМС множества пространственно распределенных радиосистем различных радиослужб, реализуемой с использованием

- оригинальных технологий построения адекватных математических моделей радиоприемников (РП) радиосистем по результатам их испытаний методом двухчастотного зондирования (ДЧЗ) [0], [0];
- дискретного линейного (DLA EMC) [0] и нелинейного (DNA EMC) [0] анализа ЭМС;
- физических испытаний РП анализируемых систем на устойчивость к воздействию выявленных потенциально опасных сигналов других систем, реализуемых в лаборатории на оборудовании [0], [0];
- геоинформационных технологий и систем (ГИС) для представления исходных данных, результатов анализа ЭМС и анализируемых сценариев применения радиосистем.

При использовании современных персональных компьютеров и рабочих станций возможна реализация технологии VTA со следующими характеристиками:

«ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2026»

Международная научно-техническая конференция, 9-10 июня 2026 г., Минск, Республика Беларусь

1. Компьютерное моделирование ЭМС в сложной ЭМО, образуемой излучениями большого количества радиосистем различных радиослужб (до 10 000 модулированных радиосигналов).
 2. Моделирование функционирования радиосистем с различными способами пространственного размещения (суша, море, воздушное и околоземное пространство).
 3. Площадь геоинформационного моделирования: до 106 кв. км и более.
 4. Диапазон частот моделирования и анализа ЭМС: 30 МГц – 40 ГГц с возможностью расширения.
 5. Модели входной нелинейности РП анализируемых радиосистем: полиномиальные высоких порядков (9-35 порядка и выше).
 6. Отношение шага частотной дискретизации к верхней границе анализируемого диапазона частот при DLA и DNA ЭМС: 10⁻⁵–10⁻⁷.
 7. Динамический диапазон DNA ЭМС: до 300 дБ.
- Анализ ЭМС радиосистем с использованием технологии VTA осуществляется в следующей последовательности:
1. Испытания РП анализируемой системы с использованием автоматизированной системы (АС) ДЧЗ и создание компьютерной модели тестируемого РП.
 2. Итерационное полунатурное моделирование ЭМС анализируемой радиосистемы при реализации анализируемого сценария функционирования группировки, включающей анализируемую радиосистему и радиосистемы – возможные источники помех (рис. 3); при анализе избранного сценария выполнение следующих процедур:
 - компьютерного моделирования с использованием ГИС размещения на местности радиосистем – возможных источников помех вокруг точки наблюдения – места расположения РП;
 - компьютерного моделирования ЭМО на входе приемной антенны РП;
 - дискретного линейного (DLA ЭМС) и нелинейного (DNA ЭМС) анализа ЭМС – компьютерного анализа поражения РП помехами в моделируемой ЭМО и определения систем, являющихся потенциально опасными источниками помех для РП;
 - экспериментальной проверки ЭМС путем физического моделирования потенциально опасных сигналов на антенном входе РП с использованием оборудования АС ДЧЗ.
- Возможности подобной проверки определяются следующим:
- анализ статистических характеристик ансамблей ЭМП, создаваемых в точке наблюдения вблизи земной поверхности множеством территориально распределенных радиопередатчиков, свидетельствует о том, что нарушение радиоприема в такой группировке радиосистем происходит вследствие воздействия не более чем одного-двух помеховых сигналов; вероятность создания помех радиоприему тремя и более источниками ЭМП крайне мала [0];
 - современные векторные генераторы сигналов, входящие в состав АС ДЧЗ (3-4 единицы), обеспечивают возможность физического моделирования одновременного воздействия на испытуемый РП в присутствии полезного сигнала заданного уровня до двух-трех импульсных и непрерывных радиопомех в широком диапазоне частот с практически любыми видами и характеристиками модуляции и с погрешностью установки их уровней не хуже 1 дБ.
3. Выполнение процедур п.2 для всего множества возможных сценариев пространственного размещения и функционирования РП и радиосистем – возможных источников помех.
 4. Выполнение вышеописанных стадий 1, 2, 3 VTA ЭМС для каждой из анализируемых радиосистем рассматриваемой территориальной группировки.

Виртуальный полигон (VTA): технология полунатурного моделирования и решения проблем ЭМС в территориальных группировках радиосистем

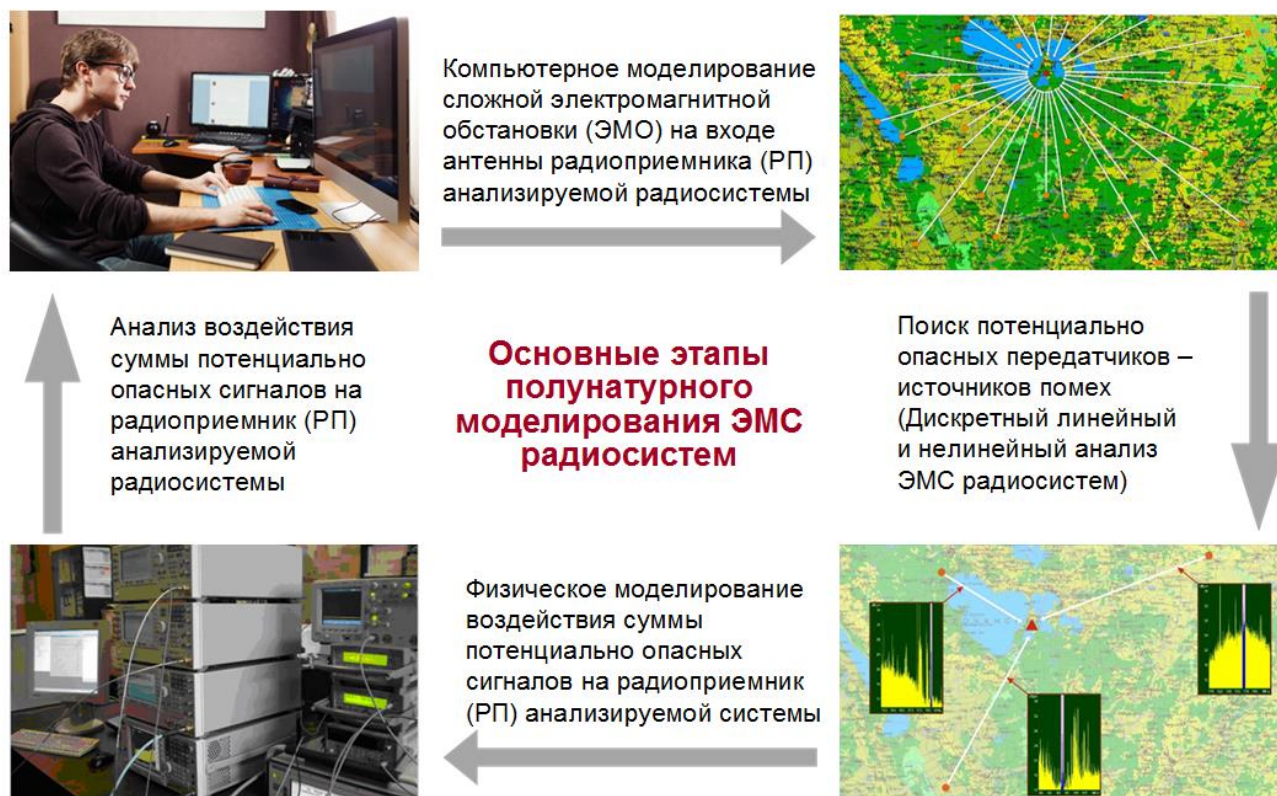


Рис. 3. Цикл полунатурного моделирования ЭМС радиосистемы при анализируемом сценарии ее размещения на местности в составе территориальной группировки радиосистем

Преимущества технологий моделирования и испытаний, обеспечивающие эффективность анализа ЭМС и ЭМЗ в группировках РЭС с использованием ЭС “EMC-Analyzer”, ЭС “E3-Analyzer” и концепции VTA

Преимущества и практическая ценность представленных выше средств анализа и обеспечения ЭМС и ЭМЗ в сложных локальных бортовых и наземных группировках ТС и территориальных группировках радиосистем определяются следующим:

1. Использование пессимистических полуаналитических моделей наихудшего случая (Worst-Case Models) паразитных ЭМ связей различной природы, спектров излучений источников и характеристик восприимчивости рецепторов ЭМП, что обеспечивает возможность анализа ЭМС и ЭМЗ при ограниченном объеме исходных данных и в широком диапазоне частот, а также позволяет практически исключить дорогостоящие ошибки 2 рода при поиске потенциально опасных паразитных ЭМ связей.

2. Высокой эффективностью оригинальных технологий DLA EMC [0] и DNA EMC [0], которые обеспечивают возможность оперативной диагностики ЭМС и моделирования поведения РП в очень сложной ЭМО (включающей практически любое число внешних модулированных сигналов в практически любом динамическом диапазоне), не предъявляя жестких требований к вычислительным ресурсам.

Характеристики нелинейности детальной математической модели РП могут иметь любой необходимый для практики порядок (до 35 и выше), причем время анализа слабо зависит от порядка входной нелинейности модели РП. Поскольку при реализации технологий DLA EMC и DNA EMC используются дискретные спектральные и временные модели ЭМО, содержащие 105–107 дискретов, то даже при наличии самой сложной ЭМО, включающей тысячи сигналов, ее традиционное упрощение путем представления отдельных сигналов с точностью до несущей не требуется (в дискретную спектральную модель ЭМО включаются дискретные модели спектров модуляции отдельных сигналов).

3. Чрезвычайно высокой информативностью оригинальной технологии ДЧЗ [0], [0] для испытаний РП и радиотехнических компонентов (усилителей радиочастоты, смесителей), используемой для тестирования РП радиосистем – потенциальных рецептов радиопомех.

По результатам этих испытаний формируется детальная математическая модель РП, адекватно отражающая все основные характеристики частотной избирательности и нелинейности РП, которые определяют его работоспособность в сложной ЭМО.

4. Высокой объективностью компьютерного моделирования ЭМО, достигаемой путем использования современных ГИС, цифровых карт местности и моделей РРВ, рекомендуемых МСЭ-Р.

5. Высокой эффективностью, точностью, информационной безопасностью и низкой (по сравнению с полигонными испытаниями) стоимостью программно-управляемого многосигнального физического моделирования поведения приемников в потенциально опасной сложной ЭМО с использованием оборудования АС ДЧЗ в лабораторных условиях. Такое моделирование исключает необходимость работы радиосистем группировки с радиоизлучениями, при которой возможны их обнаружения и идентификация средствами внешнего радиомониторинга.

Указанные преимущества представленных технологий и средств системного анализа и обеспечения ЭМС и ЭМЗ подтверждены их практическим использованием в Республике Беларусь и за рубежом при решении проблем ЭМС и ЭМЗ различных группировок ТС, включая РЭС, ВЧУ и радиосистемы различных служб, в частности, материалами [0], [0].

Список использованных источников

1. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. Сост. Д.Р.Ж Уайт. Под ред. А.И.Сапгира. М., "Сов. радио", 1977, 352 с.

2. Мордачев В.И., Синькевич Е.В., Ционенко Д.А., Орлов Е.Е. Анализ электромагнитной совместимости локальных группировок радиоэлектронных средств. Доклады БГУИР. 2019;(3):76-88.

3. EMC-Analyzer. Mathematical models and algorithms of electromagnetic compatibility analysis and prediction software complex. Minsk, BSUIR, 2026.

4. E3-Analyzer. Mathematical models and algorithms of the analysis and prediction of electromagnetic environmental effects. Minsk, BSUIR, 2026.

5. Baldwin T.E.Jr., Capraro G.T. Intrasytem Electromagnetic Compatibility Analysis Program (IEMCAP). IEEE Trans. on EMC, v.22, pp.224-228, Nov. 1980.

6. Mordachev V., Sinkevich E. "Virtual Testing Area" for Solving EMC Problems of Spatially Distributed Radiosystems based on Automated Double-Frequency Test System. – Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2010" joint with 20-th Int. Wroclaw Symp. on EMC, Poland, Wroclaw, Sept. 13-17, 2010, pp.714-720.

7. Mordachev V.I. Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses. IEEE Trans. on EMC, vol.42, No2, May 2000, pp.213-225.

8. Mordachev V., Sinkevich E. Representation and Analysis of Radio Receivers' Susceptibility and Nonlinearity by the Use of 3D Double-Frequency Characteristics, Proceedings of the 2014 Int. Symp. "EMC'14/Tokyo", Tokyo, Japan, May 12-16, 2014, p.689-692.

9. Mordachev V.I., Sinkevich E.V. Discrete technology of electromagnetic compatibility analysis at the system level: features and applications overview.- Proc. of the Int. Conf. on metrology and measurement "ICMM 2007", Vol.1, Beijing, September 5-7, 2007, pp.57-63.

10. Sinkevich E., Mordachev V. Characterization of Radio Receiver's Front-End Nonlinearity by Measurement of Spurious-Free Dynamic Ranges, Proc. of Int. Symp. "EMC Europe 2012", Rome, Italy, Sept. 17-21, 2012, 6 p.

11. Mordachev V., Loyka S. On Node Density – Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 27, No. 7, September 2009, p.1120-1131.

12. Синькевич Е.В., Мордачев В.И., Галенко А.В., Быков И.М., Бобра В.Г., Хорошевский Е.Г. Экспресс-анализ электромагнитной совместимости сложных бортовых радиосистем с использованием экспериментально уточняемых пессимистических и условно пессимистических моделей нежелательных связей «Передачик – Приемник». Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021;(6): 55–67.