

УДК 621.396.1

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ АНТЕНН ДЛЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС БОРТОВОГО РЭО ПЕРСПЕКТИВНЫХ БЕСПИ- ЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Д. А. Веденькин, В. Е. Латышев, Ю. Е. Седельников

**Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ**

Статья получена 2 декабря 2014 г.

Аннотация. В статье предлагается методика оценки коэффициентов связи антенн радиотехнических средств управления и навигации перспективных беспилотных летательных аппаратов, необходимая для оценки выполнения условий электромагнитной совместимости. Ее основу составляет электродинамическое моделирование антенн при достаточно точном воспроизведении их конструкции и геометрических размеров и ряде упрощающих допущений при описании электродинамической модели системы антенн и объекта установки. В заключении статьи приведены данные верификации предлагаемых моделей.

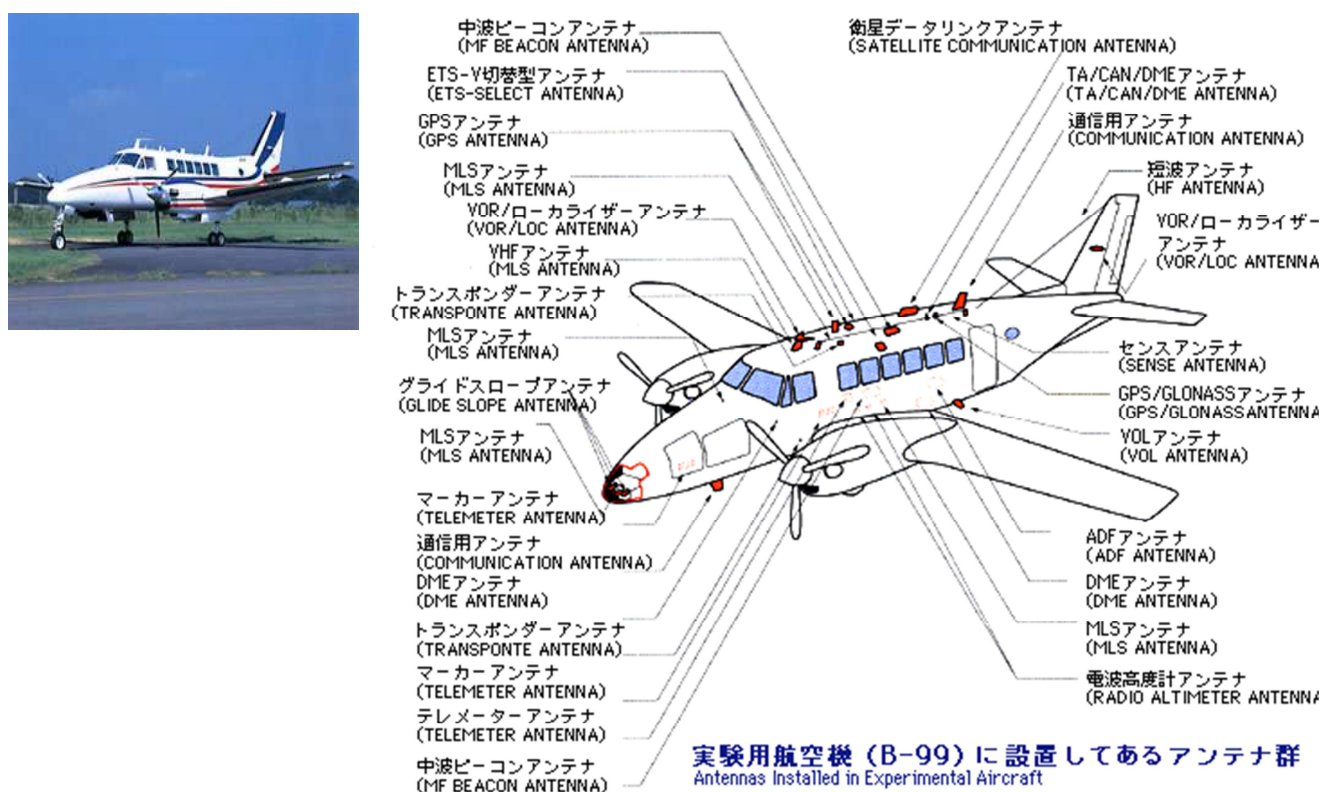
Ключевые слова: коэффициент связи антенн, электромагнитная совместимость, электродинамическое моделирование, беспилотный летательный аппарат.

Abstract The paper proposes a technique for estimating the antenna coupling coefficients of antennas for the radio control and navigation equipment of perspective UAVs, which is necessary for assessing compliance with electromagnetic compatibility. It is based on electrodynamic modeling of antennas at a sufficiently accurate reproduction of their design and geometric dimensions and a number of simplifying assumptions in the description of the electrodynamic model of antenna systems and object. In conclusion, the article presents data verification of the proposed models.

Key words: antenna coupling, electromagnetic compatibility, electrodynamic modeling, unmanned aerial vehicle.

Введение

Для современной пилотируемой авиации характерна высокая насыщенность радиоэлектронным оборудованием (РЭО) и это ставит непростые задачи по размещению его антенн, в особенности это относится к экспериментальным машинам и самолетам специального назначения. В качестве иллюстрации можно привести экспериментальный самолет JA8801 [1].



Общий вид

Схема размещения антенн

Рис. 1. Размещение антенн на самолете JA8801.

Развитие беспилотной авиации существенно расширило круг решаемых задач, что, в свою очередь, потребовало высокой оснащенности радиоэлектронным оборудованием (РЭО). По составу РЭО перспективные беспилотные летательные аппараты (БЛА) уже не уступают, а нередко и превосходят самолеты пилотируемой авиации, что требует значительных усилий для обеспечения ЭМС. Решение указанной задачи усложняется по сравнению с аналогичной для пилотируемых самолетов в силу ряда специфических особенностей современ-

ных и, тем более, перспективных БЛА. Одной из них является сложность достижения требуемой развязки антенн радиосредств.

Особенности антенных систем в составе перспективных беспилотных комплексов

Говоря об особенностях, отметим, прежде всего, следующее.

Во-первых, перспективные БЛА, как правило, имеют значительно меньшие габаритные размеры фюзеляжа, что ограничивает возможности по выбору мест размещения антенн. Кроме того, в силу конструкции крыльев и хвостового оперения, установка антенн на них практически исключается. Неизбежным результатом является необходимость плотного размещения антенн на ограниченных участках поверхности фюзеляжа, что с неизбежностью ведет к ухудшению характеристик направленности и осложняют обеспечение ЭМС РЭО.

Во-вторых, в конструкциях планеров современных беспилотных самолетов все шире используются современные композитные материалы. Несомненный выигрыш в отношении массы и прочностных показателей оборачивается серьезными проблемами в части обеспечения требуемых характеристик антенн радиотехнических средств. Основной причиной здесь является существенное отличие электрофизических свойств композитных материалов от металлов. Современные конструкционные композитные материалы, выполненные на основе углеродных волокон (в том числе со свойствами наноматериалов), обладают в диапазонах радиочастот, традиционно используемых средствами радиосвязи и навигации самолетов, свойством «полупрозрачности» для электромагнитных волн метрового и дециметрового диапазонов волн и, одновременно, непроводящей поверхностью. Эти свойства существенным образом влияют не только на конструктивные способы установки антенн, но и их электрические характеристики. В особенности отличие проявляется в отношении коэффициентов связи антенн. Заметное ослабление затеняющего эффекта, а также непосредственное прохождение электромагнитных волн через слой композитного материала могут приводить к существенному снижению развязки антенн, что ухудшает

условия совместной работы радиосредств и может потребовать принятия дополнительных мер для обеспечения ЭМС.

В-третьих, согласно существующим нормативным требованиям на немаetalлических поверхностях места установки антенн должны быть металлизированы [2].

Поэтому уже на стадии проектирования необходимо проведение достаточно достоверных оценок выполнения условий обеспечения ЭМС. Это, в свою очередь, требует разработки методов и средств оценки коэффициентов связи антенн с учетом специфики БЛА.

Прогнозирование ЭМС на этапе разработки

При создании новых образцов авиационной техники весьма важно выявить возможные нарушения на ранних стадиях разработки. С этой целью осуществляется прогнозирование ЭМС, проводимое, как правило, на основе принципа парной оценки [3-5]. Принцип парной оценки основан на поочередном расчете прогнозируемых значений мощности помех на входе каждого из рецепторов от каждого из источников для всех возможных сочетаний частот создаваемых помех и каналов приема $P_{PPpq}^{(ij)}$ и сравнении их с уровнями допустимой помехи $P_{PPpq\ доп}^{(ij)}$

$$P_{PPpq}^{(ij)} < P_{PPpq\ доп}^{(ij)} \quad (1)$$

Значения $P_{PPpq}^{(ij)}$ зависят от свойств передатчика, приемника и величины ослабления помехи на пути распространения от источника помех к рецептору.

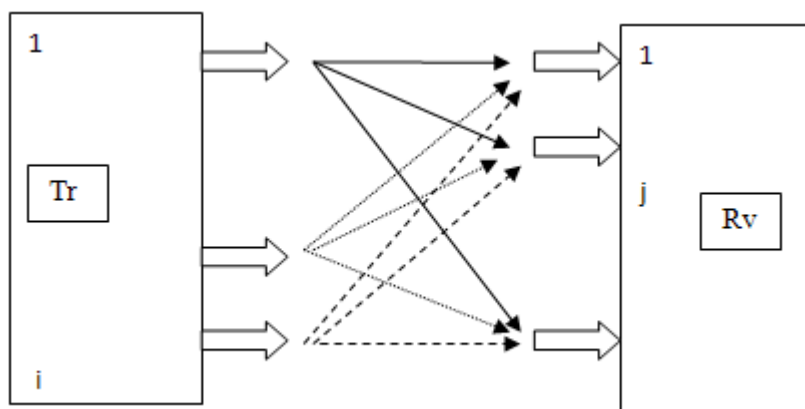


Рис. 2. К парной оценке ЭМС.

Для каждой $(p-q)$ - й пары мощность принятой помехи равна:

$$P_{P\Pi\ \partial on} = P_{ИП} + L_{ИП}^{(i)} + L_{срi} + L_{P\Pi}^{(j)}, \quad (2)$$

а условием ЭМС - отсутствие превышений уровней допустимой помехи:

$$P_{P\Pi\ \partial on} < P_{P\Pi\ \partial on} \quad (3)$$

для всех возможных совпадений полос частот приема и передачи. где $P_{ИП}$ - номинальная мощность передатчика, – ослабление помехи источником, средой распространения и рецептором соответственно (все величины – в дБ).

Поскольку на этапе предварительного анализа величины $L_{ИП}^{(i)}$, $L_{P\Pi}^{(j)}$ и $L_{P\Pi\ \partial on}^{(ij)}$ с некоторой степенью достоверности известны, прогнозирование ЭМС сводится к сравнению коэффициентов связи антенн с требуемыми значениями:

$$L_A^{(i)} < P_{P\Pi\ \partial on} - L_{ИП}^{(i)} - L_{P\Pi}^{(i)} - P_{ИП} \quad (4)$$

Оценка коэффициентов связи антенн

Коэффициент связи двух антенн можно представить как¹

$$L_A^{(i)} = 10\lg\left(\frac{K_{УИП}^{(i)}K_{УP\Pi}^{(i)}F_{ИП}^{(i)}F_{P\Pi}^{(i)}(1 - \Gamma_{ИПi}^2)(1 - \Gamma_{P\Pi i}^2)}{(4\pi R/\lambda^{(i)})^2}\right) \quad (5)$$

где $K_{УИП}^{(i)}, K_{УP\Pi}^{(i)}, F_{ИП}^{(i)}, F_{P\Pi}^{(i)}$ - значения коэффициентов усиления антенн их ДН по мощности в направлении друг на друга на i -й частоте, $\Gamma_{ИПi}^2$ и $\Gamma_{P\Pi i}^2$ - коэффициенты отражения по мощности, R и $\lambda^{(i)}$ - расстояние между антеннами и длина волны соответственно.

Соотношение (5) приведено с целью подчеркнуть то, что для большинства слабонаправленных антенн преобладающий вклад в значения коэффициента связи вносят значения ДН антенн с учетом их расположения на самолете и расогласование на частотах вне рабочей полосы частот передатчиков и приемников, (т.е. на частотах неосновных излучений и каналов приема). При этом, если

¹ Вообще говоря, соотношение (5) справедливо для случая расположения антенн совпадающей поляризации в свободном пространстве в дальней зоне. В нашем случае оно служит только для обсуждения общего характера поведения $L_A^{(i)}$ и может быть в этом качестве принято с соответствующими оговорками.

для оценки значений и вполне допустима замена реальных антенн на упрощенные модели, например типа четвертьволновый штырь, оценка рассогласования требует детального учета конструкции анализируемых антенн. Использование в этих условиях аналитических методов анализа исключено.

Наиболее эффективный путь для традиционных задач анализа антенн на металлических объектах состоит в использовании проверенных современных средств электродинамического моделирования. В задачах моделирования антенн, установленных на объектах с металлической оболочкой, хорошо зарекомендовали себя пакеты электродинамического моделирования CST Microwave Studio и FEKO [8-9]. Иллюстрирующие примеры их применения показаны на рис. 3-4 [10-11].

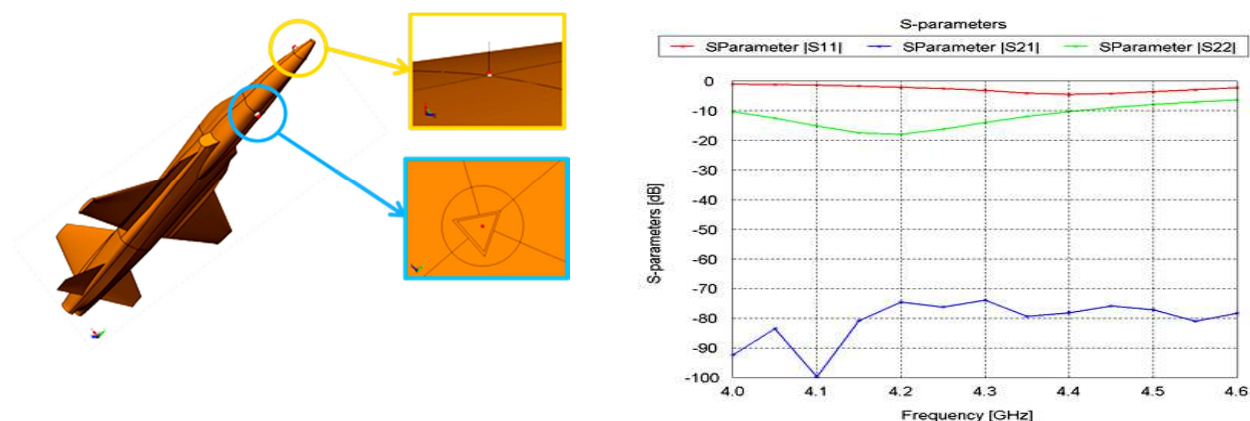


Рис.3. Анализ КС в пакете FEKO.

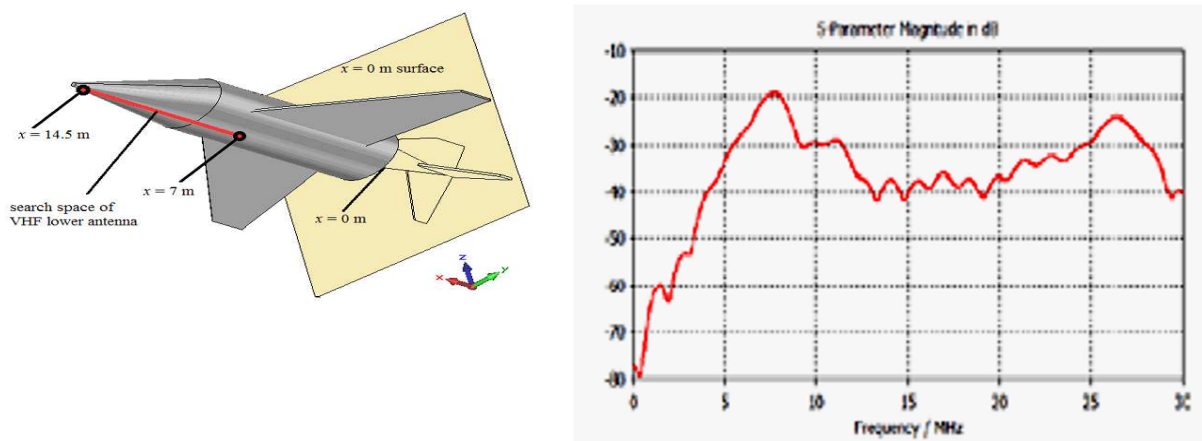


Рис. 4. Анализ КС в пакете CST Microwave Studio.

К сожалению, непосредственное использование указанных пакетов в задачах анализа развязки антенн, устанавливаемых на самолете, в нашем случае практически исключено по ряду причин.

Во-первых, практически невозможно непосредственно заложить в анализируемую модель оболочку фюзеляжа самолета при его выполнении из современных композитных материалов. Последние представляют собой слоистый материал с диэлектрическими слоями с различными ϵ и $tg\delta$ и сеток, выполненных из углеродных нитей с конечной проводимостью материала рис. 5.

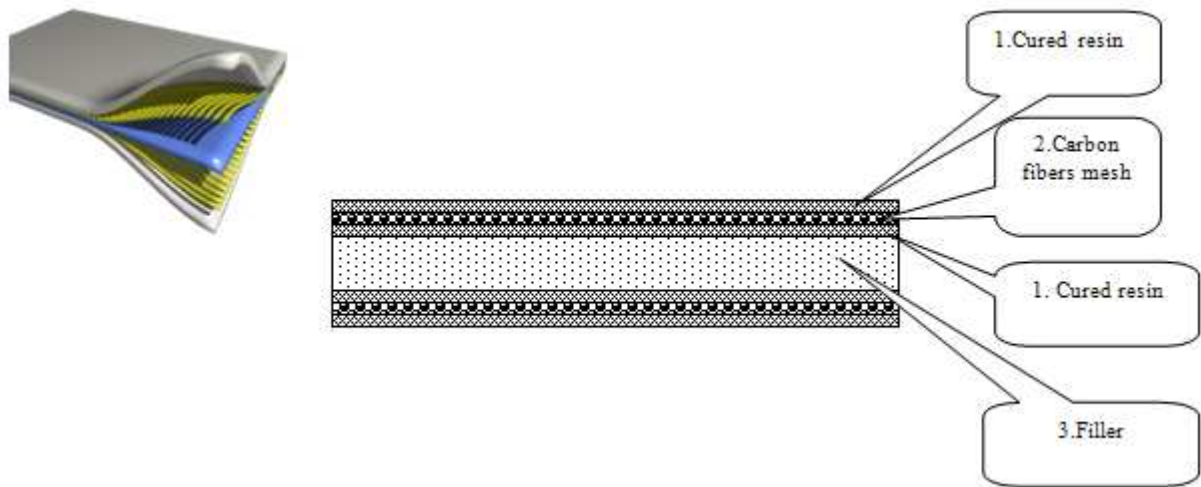


Рис. 5. Композитный материал. 1 – диэлектрик с $\epsilon \approx 3 \dots 5$ и $tg\delta \approx 10^{-3}$, 2 – сетка из нитей с удельной проводимостью на 1..2 порядка меньшей по сравнению с металлом, 3 – диэлектрик с $\epsilon \approx 1$ и $tg\delta \approx 0$.

Указанные материалы «полупрозрачны» для радиоволн дециметрового и более низкочастотных диапазонов волн и, кроме того обладают ярко выраженными анизотропными свойствами.

Во-вторых, участок поверхности объекта в местах установки антенн имеет металлизированное покрытие конечных размеров и определенной формы [2].

Попытка составить и проанализировать в указанных средах модель объекта, выполненного из композитного материала с детальной прорисовкой нескольких антенн требует огромных вычислительных ресурсов. Поэтому, необходимо идти на существенные упрощения, стараясь не допустить при этом утрату достоверности оценки. Указанные упрощения можно провести при ак-

куратном обращении с объектом анализа исходя из физических соображений.

Методика оценки коэффициентов связи антенн

Как отмечалось выше, для получения практических оценок введение ряда упрощений неизбежно. Рассмотрим возможности уменьшения «размеров» исходной задачи, состоящей в расчете матриц развязок из $2M_{\text{ИП}} M_{\text{РП}}$ элементов:

$$L_{Apq}^{(i)} \neq L_{Aqp}^{(i)} \quad (6)$$

Заметим, что (6) не означает нарушения принципа взаимности. Приведенное неравенство подчеркивает тот факт, что речь, в общем случае, идет о воздействии как p -го передатчика как источника на q -й приемник, так и возможном воздействии q -го передатчика на p -й приемник, когда каждый приемопередатчик предназначен для работы в своей полосе частот.

Существует ряд возможностей для сокращения объема вычислений.

Во-первых, можно уменьшить необходимое число анализируемых значений $L_{Apq}^{(i)}$ и $L_{Aqp}^{(i)}$. Основу для этого предоставляет отборочный принцип в задаче анализа ЭМС [3-5]. Независимо от деталей осуществления, принцип заключается в поэтапном проведении предварительных оценок, начиная с самых грубых [3-7]. При этом после каждого этапа все pq – комбинации, для которых выполняется условие (3) - из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Во-вторых, при проведении электродинамического моделирования нет необходимости в использовании модели объекта со всеми, установленными на нем, антеннами. Достаточно ограничиться поочередным заданием анализируемой пары антенн. Действительно, говоря строго, при моделировании должны присутствовать все антенны, входящие в состав бортового оборудования. Это следует хотя бы из рассмотрения матричной модели системы антенн [12-13] (Рис. 6).

Рассмотрим входы pq -й пары антенн, считая, что к остальным подключены нагрузки с коэффициентами отражения Γ_q

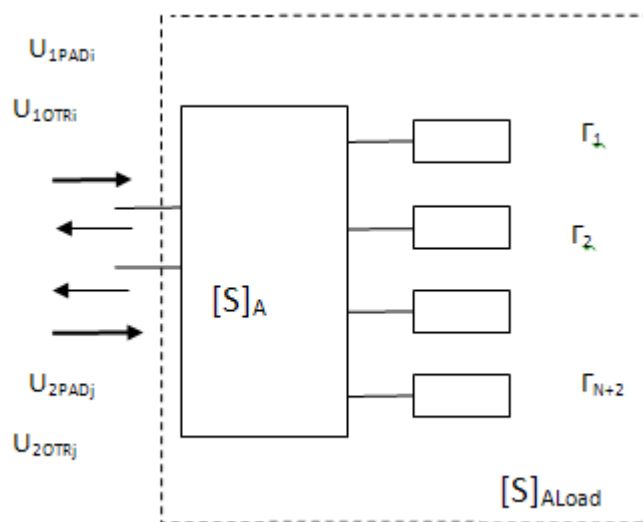


Рис. 6. К расчету коэффициентов связи.

Коэффициент связи pq -й пары антенн равен

$$[S_{ALpq}] = \left[[S_{11pq}^b] + [S_{12pq}^b] \left[[1 \setminus \Gamma] - [S_{22pq}^b] \right]^{-1} [S_{21pq}^b] \right] \quad (7)$$

$$\text{где } [1 \setminus \Gamma] = \begin{bmatrix} 1 \setminus \Gamma_n & 0 & 0 \\ 0 & 1 \setminus \Gamma_{n+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \setminus \Gamma_{n+M} \end{bmatrix},$$

Γ_n – коэффициент отражения нагрузки подключенной к n -му входу, блочные матрицы связывают между собой значения амплитуд падающих и отраженных волн для: $[S_{11pq}^b]$ ij - пары входов, $[S_{12pq}^b]$ и $[S_{21pq}^b]$ -- коэффициенты передачи между pq -й парой входов и остальными входами, $[S_{22pq}^b]$ - аналогично $[S_{11pq}^b]$ для остальных входов при условии подключения ко всем входам согласованных нагрузок.

В большинстве практически важных случаев можно пренебречь влиянием переотражений между входами антенн и нагрузками и точное выражение (7) существенно упрощается:

$$[S_{ALpq}] \approx \left[[S_{11pq}^b] + [S_{12pq}^b] [S_{21pq}^b] \right] \quad (8)$$

Если значения коэффициентов передачи матрицы рассеяния $[S_A]$ соизмеримы по величине и $|S_{Amn}| \ll 1$, можно пренебречь и вторым членом в (7):

$$S_{ijL} \approx S_{ij} \quad (9)$$

Это означает возможность проведения попарной оценки коэффициентов связи в отсутствии остальных антенн в составе модели объекта. Заметим, что строгая оценка в соответствии с (7) в реальности все равно неосуществима ввиду отсутствия достоверных данных о входном импедансе приемников с учетом АЧХ тракта вне рабочей полосы частот. Эти данные не только не нормируются, но даже не входят в число паспортных технических показателей.

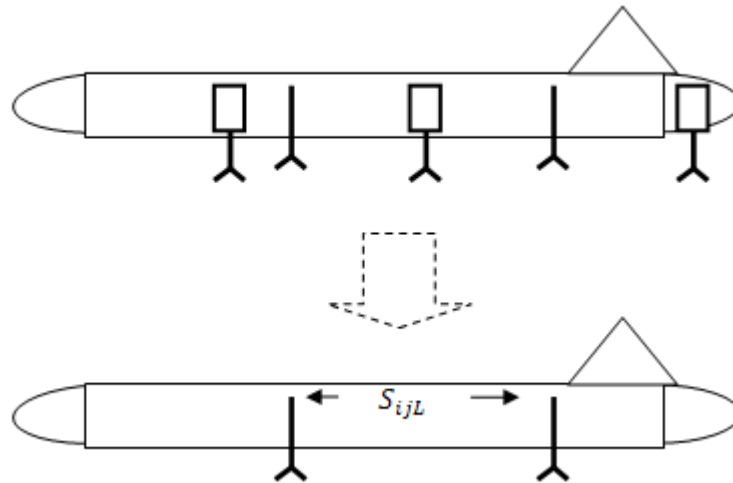


Рис. 7. Упрощенная модель антенной системы.

В-третьих, неизбежно существует необходимость в упрощении модели объекта установки антенн. Указанное упрощение может быть сделано на следующей основе. Композитный материал рассматривается как неидеальный однородный диэлектрик, параметры ε и $tg\delta$ которого выбираются из некоторого условия эквивалентности реальному материалу (в действительности представляющему довольно сложную комбинацию из диэлектрических слоев и электропроводящих сеток). Эквивалентность в данном случае означает равенство комплексных коэффициентов прохождения однородной плоской волны при нормальном падении на слой композитного материала и слой эквивалентного диэлектрика при равных значениях толщины слоев. Коэффициент прохождения через слой композитного материала определяется экспериментально, параметры ε и $tg\delta$ эквивалентного материала – расчетом по известным зависимостям для прохождения волн через слой диэлектрика [14-15].

На рис. 8 показаны измеренные значения коэффициентов отражения и прохождения для одного из обследованных образцов композитного материала

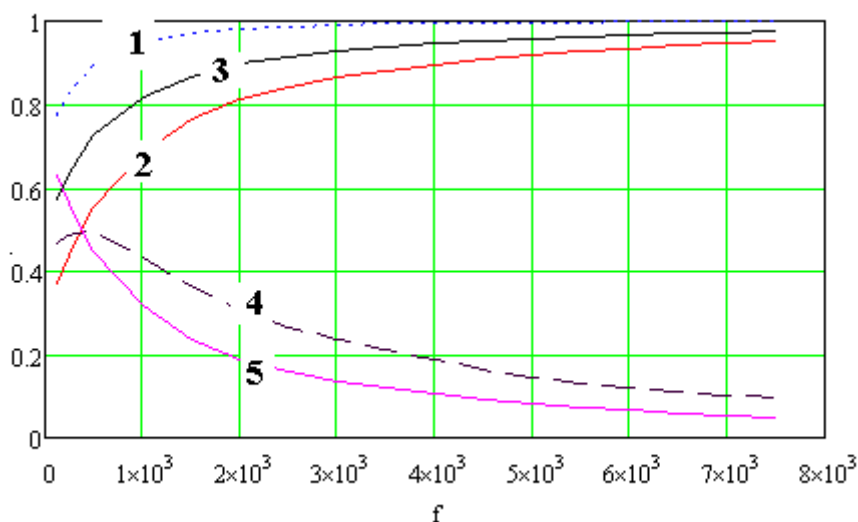


Рис. 8. Усредненные измеренные параметры листа композитного материала. 1-2 – границы коэффициента отражения, 3 – его среднее значение, 4 – коэффициент прохождения, 5 – потери.

Наконец, исходя из физического существа коэффициента связи антенн, можно допустить, что преобладающим фактором развязки антенн является рассогласование их на частотах, далеко отстоящих от рабочей полосы частот, а для антенн, расположенных на противоположных сторонах фюзеляжа – еще и эффект затенения. При этом основную роль играет электрический размер поперечного сечения, а точная его форма не столь существенна. Еще менее существенен вклад формы и размеров крыльев и хвостового оперения. Исходя из этого допущения, можно упростить модель объекта установки, ограничившись фрагментом фюзеляжа. Заметим, что конструкция собственно антенны должна воспроизводиться с максимально возможной степенью детализации.

При указанных допущениях расчеты коэффициентов связи становятся реально возможными на современных персональных компьютерах, т.е. без использования уникальной вычислительной техники. В качестве вычислительной среды авторами использовалась система CST Microwave Studio (версия 6.0, лицензионная). Ниже приведены некоторые результаты расчетов и экспериментальной проверки пригодности упрощенной модели для анализа антенн, установленных на объектах, выполненных из углеродосодержащего композитного материала.

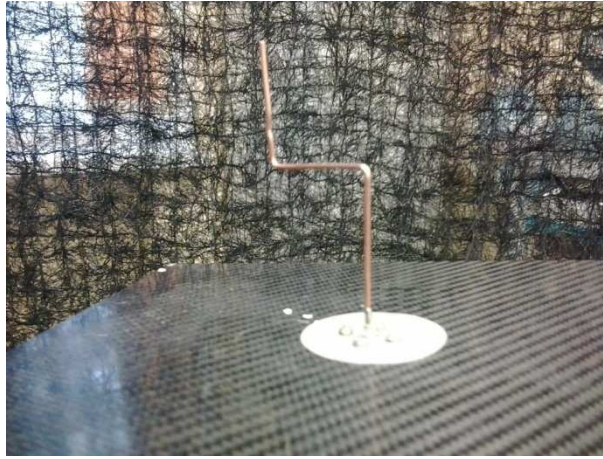


Рис. 9. Пробная модель антенны.

В Табл. 1-2 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных - значения коэффициента отражения и резонансной частоты.

Таблица 1

№ п/п	Диаметр металлической подложки, мм	Расчетные значения S_{11} , дБ	Измеренные значения S_{11} , дБ
1	50	-20,63	-21,99
2	100	-26,97	-22,42
3	150	-24,58	-24,35
4	200	-20,3	-26,31

Таблица 2

№ п/п	Диаметр металлической подложки, мм	Резонансная частота, ГГц. Расчет	Резонансная частота, ГГц. Эксперимент
1	50	1,474	1,456
2	100	1,461	1,459
3	150	1,453	1,454
4	200	1,452	1,456

Сравнение расчетных и экспериментальных данных коэффициентов связи антенн

Анализировался ряд сочетаний штатных антенн связных радиосредств «Прима-ДВ», «Пульсар», приемопередатчика системы УВД и некоторых других из числа радиосредств экспериментального беспилотного самолета.

Электродинамическое моделирование на основе предложенной процедуры осуществляется с использованием ряда допущений и упрощений, правомерность которых может быть установлена только путем прямого эксперимента. С этой целью осуществлено измерение коэффициентов связи антенн, установленных на реальном образце самолета, конструкция которого выполнена из композитного материал. При проведении эксперимента типы и конструкция анализируемых антенн, места их установки на обшивке соответствовали данным для моделируемых антенн.

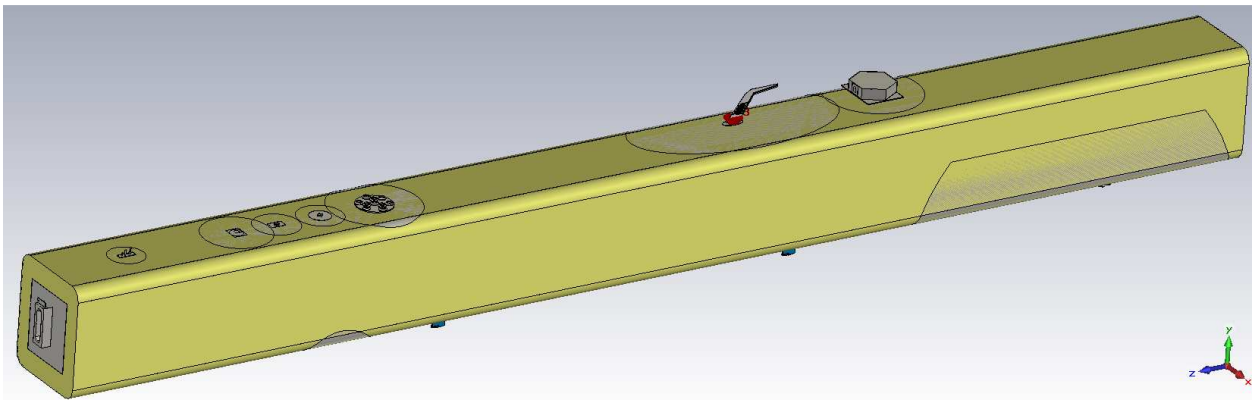


Рис. 10. Эквивалент планера с установленными антеннами, верхняя часть.

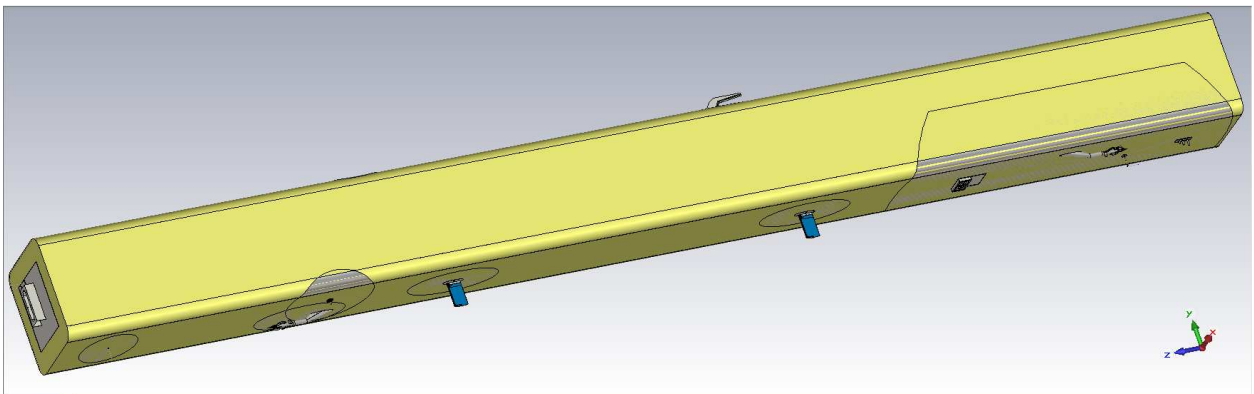
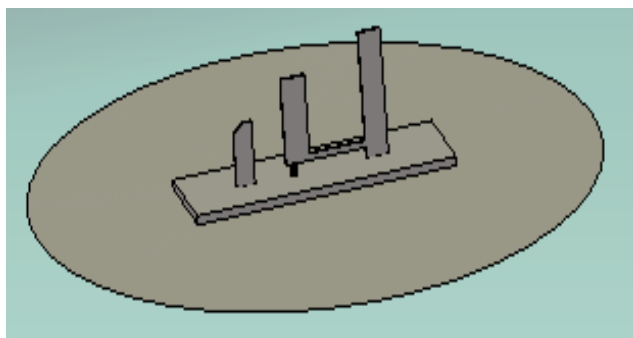
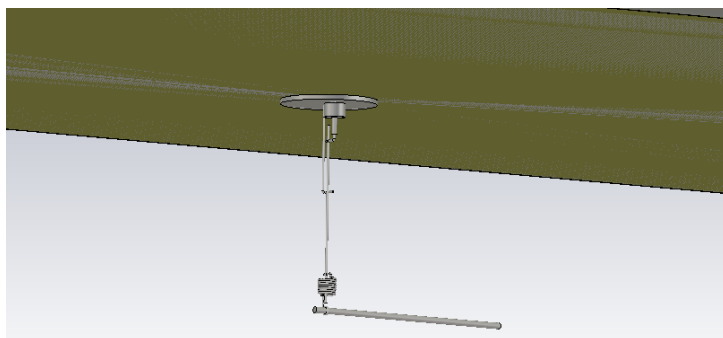


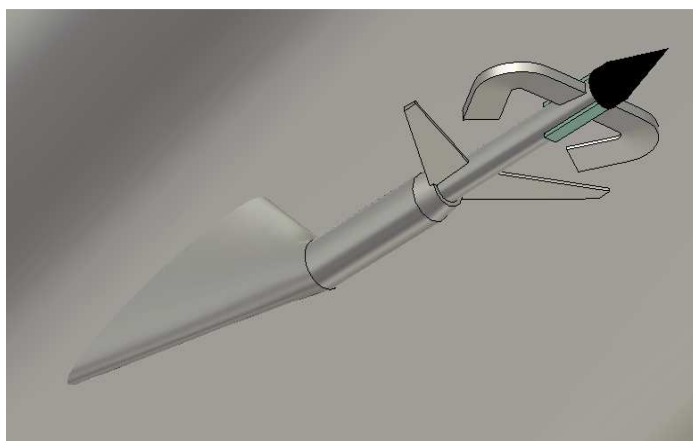
Рис.11. Эквивалент планера с установленными антеннами, нижняя часть.



Антенна ответчика СГО



Антенна системы передачи данных



Антенна ответчика УВД

Рис. 12. Анализируемые антенны.

Таблица 3. Сравнение расчетных и измеренных значений КС

Передатчик	Приемник	Коэффициент связи, дБ (моделирование)	Коэффициент связи, дБ (эксперимент)
Радиоканал телекодовой связи	Радиоканал передачи данных	-49.4	-51.3
	Бортовой навигационный приемник	-84	-85.8
Радиоканал передачи данных	Радиоканал телекодовой связи	-51.7	-49.6
	Бортовой навигационный приемник	-95.3	-92.38

Заключение

Проведенная работа показывает возможность получения оценок значений коэффициентов связи антенн относительно простыми средствами и при приемлемых затратах времени. Использование предложенной методики в практике прогнозирования ЭМС БРЭО для перспективных авиационных комплексов целесообразно не только из-за отсутствия на этапе предварительной проработки образцов планера и антенн. Для некоторых изделий определить развязку антенн практически невозможно и на более поздних этапах по чисто техническим причинам, например, когда радиоэлектронное средство выполнено в виде моноблока и отсутствует доступ к его высокочастотной части.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания 3.1962.2014/К.

Литература

1. Экспериментальный самолет JA8801 Электронный ресурс <http://www.enri.go.jp/eng/library/publication/pdf/2002-148.pdf> (Дата обращения: 20.11.2014).
2. ГОСТ Р 50860-2009 Самолеты и вертолеты. Устройства антенно-фидерные радиосвязи, навигации, посадки и управления воздушным движением.
3. Уайт Д. ЭМС радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. \Пер. с англ. Под ред. А.И. Сапгира. Вып.1. М. : Сов. Радио, 1977. - 348 с.
4. Петровский В.И., Седельников Ю.Е. ЭМС Радиоэлектронных средств. М. : Радио и связь. 1986. - 216 с.
5. Седельников Ю.Е. ЭМС Радиоэлектронных средств. Казань, ЗАО «Новое Знание». 2006. - 304 с.
6. Шатраков Ю.Г., Ривкин М.И., Цыбаев Б.Г. Самолетные антенные системы М. : Машиностроение, 1979. - 184 с.

7. C.W. Wang, Ph.D. T. Keech, Ph.D. Antenna Models For Electromagnetic Compatibility Analyses NTIA TM-13-489 U.S. Department of Commerce October 2012 <http://www.ntia.doc.gov/report/2012/antenna-models-electromagnetic-compatibility-analyses>.
8. FEKO Система 3D электромагнитного моделирования FEKO http://rtf.sfedu.ru/noc1/soft_feko.html (Дата обращения: 22.11.2014).
9. CST MICROWAVE STUDIO <https://www.cst.com/Products/CSTMWS> (Дата обращения: 22.11.2014).
10. MUSTAFA URAL SOLUTION OF THE ANTENNA PLACEMENT PROBLEM BY MEANS OF GLOBAL OPTIMIZATION TECHNIQUES. <http://www.feko.info/applications/white-papers/> (Дата обращения: 23.11.2014).
11. Antenna-placement-on-aircraft-platforms-with-feko-and-antenna-magus <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12612674/index.pdf> (Дата обращения: 25.11.2014).
12. Сазонов Д.М. Матричная теория антенных решеток.- Рязань, изд-во РРТИ,1975 – 120 с.
13. Лаврушев В.Н, Седельников Ю.Е. Проектирование антенных систем с учетом требований развязки. Диссертация на соиск. учен. степ.канд. техн. наук. Казанский авиационный институт, 1983 – 136с.
14. Романов А.Г. Седельников Ю.Е. Измерение коэффициента отражения сетчатых материалов. Труды Международной научно-технической конференции «Радиолокация, радионавигация, связь 2013» Воронеж «Секвое» стр. 1632-1642.
15. Веденькин Д.А, Насыбуллин А.Р., Седельников Ю.Е Измерение относительной диэлектрической проницаемости и коэффициента затухания композитных материалов Тезисы доклада Международной НТК «Нигматуллинские чтения 2013.» <http://kai.ru/science/konf/nigmatullin/NigRead13.pdf> стр. 220-222. (Дата обращения: 25.11.2014).