

УДК 621.396

В.Е. Митрохин, К.А. Бондаренко, А.В. Ряполов

Оценка проникновения электромагнитных полей различной поляризации в экранирующую оболочку с отверстием

Приводятся результаты моделирования экранирующей оболочки радиоэлектронной аппаратуры, имеющей технологическое отверстие в стенке, при воздействии внешних электромагнитных полей. Моделирование выполняется методом конечных разностей во временной области. Рассматриваются гармонические электромагнитные поля следующих типов поляризации: круговая, горизонтальная, вертикальная, эллиптическая. Оценивается значение электрической компоненты поля в центре экранированного объема в зависимости от частоты и угла падения для всех типов поляризации электромагнитных волн. По полученным значениям построены графические зависимости, на которых видно, что в отдельных случаях проникновение электромагнитных волн круговой поляризации больше, чем для волн других типов поляризации.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, экранирование, поляризация электромагнитной волны.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-23-27

Вопросу повышения эффективности электромагнитных экранов радиоэлектронной аппаратуры и кабелей связи посвящено множество научных работ, но интерес к этой проблеме по-прежнему высокий, о чем свидетельствуют недавние публикации [1, 2].

Тенденции развития технологий беспроводной связи и передачи данных таковы, что требуется повышение несущих радиочастот. Находящаяся поблизости сторонняя радиоэлектронная аппаратура может быть уязвимой к новым высокочастотным электромагнитным полям. Здесь любое технологическое отверстие в корпусе устройства может стать источником помех для внутренних цепей. Попутно производители беспроводных средств решают проблему улучшения качества приема сигналов. Например, для сетей сотовой связи кроме обычных антенн с вертикальной поляризацией используют ММО-антенны с разнесением по поляризации каналов приема и передачи или антенны с круговой поляризацией [3], которые дают выигрыш 3 дБ по мощности сигнала. Электромагнитные волны круговой и эллиптической поляризации эффективно проходят через преграды на пути распространения сигнала. Для сторонней радиоэлектронной аппаратуры это также может иметь негативный эффект с точки зрения электромагнитной совместимости. В данной работе описаны результаты исследования, где оценивалось проникновение электромагнитных полей различной поляризации через отверстие в экране.

Описание условий моделирования

Исследование проникновения электромагнитных полей через отверстие в металлическом экране производилось путем численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области (КРВО, FDTD) [4]. Экранирующая оболочка была задана в виде параллелепипеда с габаритными размерами $400 \times 400 \times 200$ мм и толщиной стенки 1 мм, аналогично той, что рассмотрена в работе [5]. В центре верхнего основания экрана находится отверстие диаметром 30 мм. На это же основание под некоторым углом падает плоская электромагнитная волна (рис. 1). Была поставлена задача

оценить, как влияют поляризация и угол падения электромагнитной волны на ее проникновение во внутреннее пространство экрана.

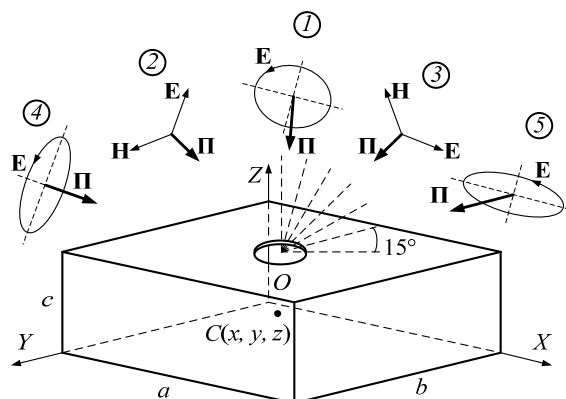


Рис. 1. Схематическое представление вычислительного эксперимента

Были рассмотрены электромагнитные поля пяти видов поляризации (см. рис. 1): 1 – круговая поляризация, 2 – вертикальная поляризация, 3 – горизонтальная поляризация, 4 – эллиптическая поляризация с преобладанием вертикальной компоненты, 5 – эллиптическая поляризация с преобладанием горизонтальной компоненты. Горизонтальная плоскость в счетном пространстве совпадает с основанием экрана, где расположено отверстие.

В литературных источниках встречаются варианты разложения гармонических электромагнитных полей двумя способами: линейная поляризация – суперпозиция двух полей круговой поляризации с левым и правым направлениями вращения векторов электрического поля или круговая поляризация – суперпозиция двух перпендикулярных полей линейной поляризации, сдвинутых относительно друг друга по фазе на 90° [6, 7].

При задании источников электромагнитного поля в расчетах методом КРВО достаточно просто задается плоская волна линейной поляризации, лежащая в плоскости двух координатных осей счетно-

го объема, например xOy , и распространяющая вдоль третьей оси, т.е. Oz [8]. В [9] описано, каким образом нужно дополнить расчет, чтобы задавать распространение плоской волны под произвольным углом. Пользуясь вышеизложенными методиками, было рассмотрено падение плоских электромагнитных волн под углами: 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90°. В случае нормального падения волны моделирование было ограничено тремя вариантами поляризации – круговая, горизонтальная и эллиптическая.

Во всех случаях электромагнитные волны задавались через электрическую компоненту, модуль которой равнялся 100 В/м. Магнитная компонента определялась через сопротивление свободного пространства 377 Ом. Все последующие результаты приведены для электрической компоненты.

Круговой и эллиптические варианты поляризации задавались как наложение двух линейных электромагнитных волн, имеющих разность фаз 90°. Для круговой поляризации обе волны имели одинаковые амплитуды. Волны с эллиптической поляризацией задавались таким образом, чтобы большая полуось эллипса, описываемого вектором электрического поля, отличалась от малой в 2 раза.

Электромагнитные волны возбуждались гармоническими колебаниями в диапазоне частот 0,1–5 ГГц с шагом 100 МГц (50 значений). Этот диапазон частот включает в себя несколько резонансов, значения которых предварительно были оценены исходя из габаритных размеров экрана. Первый резонанс наблюдается при частоте около 800 МГц.

Таким образом, для семи вариантов угла падения воздействующего поля при пяти типах поляризации (три для нормального падения волны) моделирование было проведено 1650 раз.

Для упрощения расчетов было сделано допущение, что экран выполнен из идеально проводящего металла, т.к. на указанных частотах глубина проникновения электромагнитного поля в металл стремится к нулю и поле полностью отражается от границы раздела «воздух–металл».

Также время моделирования было ограничено 50 периодами колебаний на частоте воздействующего поля. При минимальной частоте 100 МГц время моделирования было наибольшим, число ячеек дискретизации счетного объема наименьшим, а при максимальной частоте 5 ГГц оно было наименьшим, но за счет меньших размеров элементарной ячейки процесс расчета занимал наибольшее время. Было замечено, что быстрее всего расчет выполнялся на частотах вблизи 1 ГГц.

Вначале цикла расчета для задающих гармонических колебаний задавался плавный старт, который описывается выражением

$$s(t) = (1 - e^{-\tau t}) \cdot \sin(2\pi f t), \quad (1)$$

где τ – параметр времени, задающий убывание экспоненты в течение 2–3 периодов рассматриваемой частоты; f – одна из пятидесяти рассматриваемых частот.

Если использовать простой синусоидальный сигнал, то начало расчета сопровождается резким скачком амплитуды электромагнитного поля, превышающим заданные значения, что вносит погрешность в результаты расчета.

Регистрация электромагнитного поля производилась в центре экранирующей оболочки (точка C на рис. 1). По значениям компонент электрического поля вдоль осей Ox , Oy и Oz находилось его абсолютное значение. Аналогично для магнитного поля.

Результаты моделирования

На рис. 2 и 3 приведены примеры временных зависимостей абсолютного значения электрической компоненты поля, зарегистрированного в центре металлического экрана на частотах 1,8 и 2 ГГц. На обоих рисунках для сравнения показаны электромагнитные поля при круговой и горизонтальной поляризации. Отличие рис. 3 от рис. 2 состоит в том, что при частоте 2 ГГц в экране наблюдается резонанс.

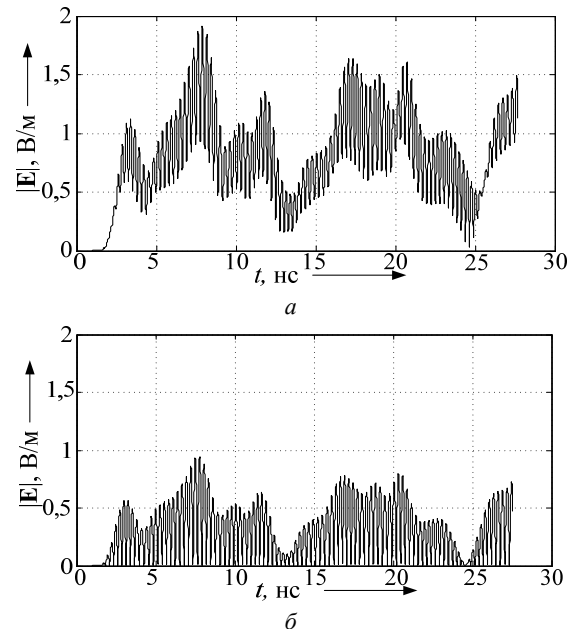


Рис. 2. Абсолютные значения электрического поля, зарегистрированного в центре экрана на частоте 1,8 ГГц при падении волны под углом 45°: a – круговая поляризация; b – горизонтальная поляризация

Следует заметить, что при резонансных частотах точно оценить значение электромагнитного поля внутри экрана не представляется возможным, т.к. оно постоянно увеличивается, поэтому далее представлены результаты, полученные после 50 периодов колебаний. По всем проведенным расчетам были определены максимальные значения электрической компоненты поля, которые далее представлены на рис. 4 и 5. Верхние кривые на этих рисунках соответствуют нормальному падению электромагнитных волн. Кривые, расположенные ниже друг за другом, получены при последовательном изменении угла падения от 0 до 90° с шагом 15°.

Можно заметить, что кривые на рис. 4, а и б визуально не различаются, хотя поляризация электромагнитных полей разная. Также на этих графиках видно, что уровень электрической компоненты поля держится примерно на одном уровне при изменении угла падения от 0 до 60°. Спад происходит уже при достижении угла падения 75°

и 90°, когда электромагнитное поле движется параллельно грани экрана с отверстием.

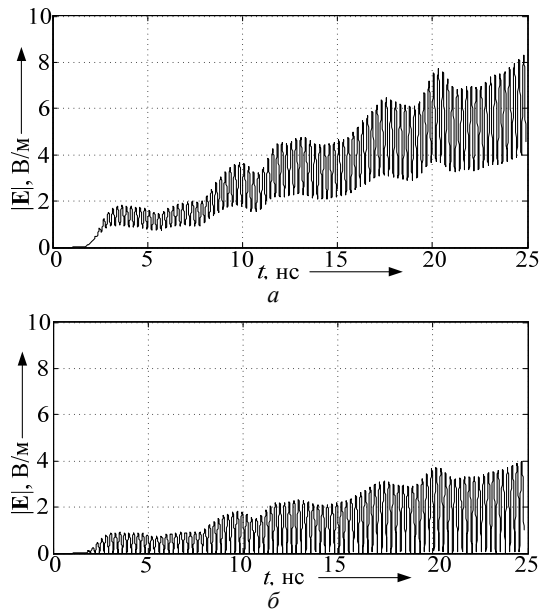


Рис. 3. Абсолютные значения электрического поля, зарегистрированного в центре экрана на частоте 2 ГГц при падении волны под углом 45°: а – круговая поляризация; б – горизонтальная поляризация

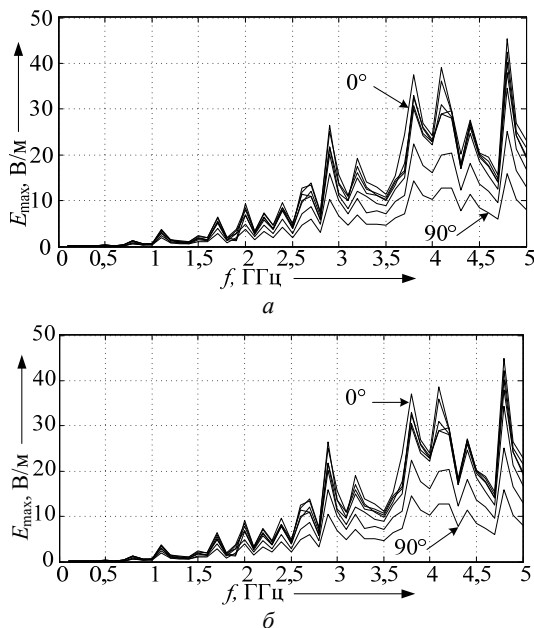


Рис. 4. Максимальные значения модуля электрического поля, зарегистрированного в центре экрана при углах падения электромагнитных волн 0 – 90°: а – круговая поляризация; б – вертикальная поляризация

На рис. 5 показаны такие же частотные зависимости, но полученные при горизонтальной поляризации (см. рис. 5, а) и при эллиптической поляризации с преобладанием горизонтальной составляющей (см. рис. 5, б). Видно, что для данных типов поляризации убывание электрической компоненты поля в экране при увеличении угла падения происходит значительно быстрее, чем для круговой и вертикальной поляризации. Причем при горизонтальной направленности вектора электрического поля убывание происходит практически равномерно.

Самая нижняя кривая на рис. 5, а, соответствующая углу падения 90°, близка к нулевому значению, и уровня электромагнитного поля недостаточно для того, чтобы вызвать значительный резонанс в объеме экрана. При эллиптической поляризации с преобладанием горизонтальной составляющей (см. рис. 5, б) с увеличением угла падения также убывает уровень электрической компоненты поля в экране, но убывание слабее, чем при горизонтальной поляризации. В случае падения под углом 90° значение электромагнитного поля по-прежнему высокое, т.к. на нижней кривой отчетливо проявляются пики, соответствующие резонансным частотам.

Что касается пятого типа поляризации, эллиптической с преобладанием вертикальной компоненты поля, то в этом случае были получены значения, идентичные электромагнитному полю с вертикальной поляризацией.

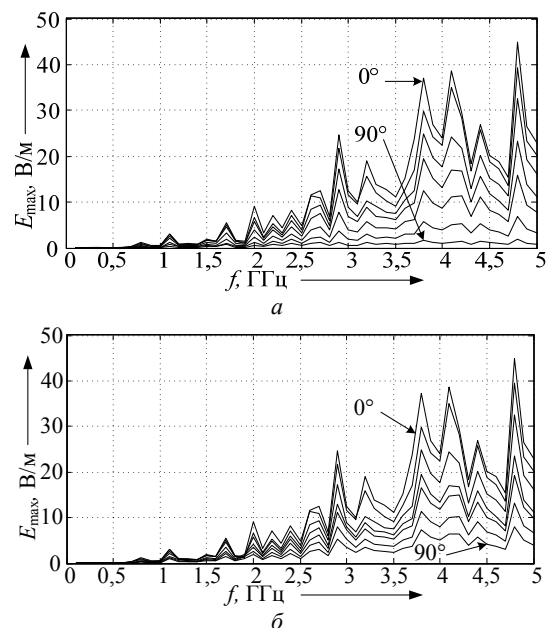


Рис. 5. Максимальные значения модуля электрического поля, зарегистрированного в центре экрана при углах падения электромагнитных волн 0 – 90°: а – эллиптическая поляризация с преобладанием горизонтальной компоненты; б – горизонтальная поляризация

Полученные результаты были проанализированы также другим способом: на одинаковых частотах, но при разных углах падения. На рис. 6. показаны

примеры зависимостей модуля электрического поля для всех типов поляризации от угла падения при частотах 0,2; 0,8 и 2 ГГц. Частоты 0,8 и 2 ГГц находятся вблизи резонансов экрана.

Нумерация зависимостей, показанных на рис. 6: 1 – круговая поляризация, 2 – вертикальная поляризация, 3 – горизонтальная поляризация, 4 – эллиптическая поляризация с преобладанием вертикальной компоненты, 5 – эллиптическая поляризация с преобладанием горизонтальной компоненты.

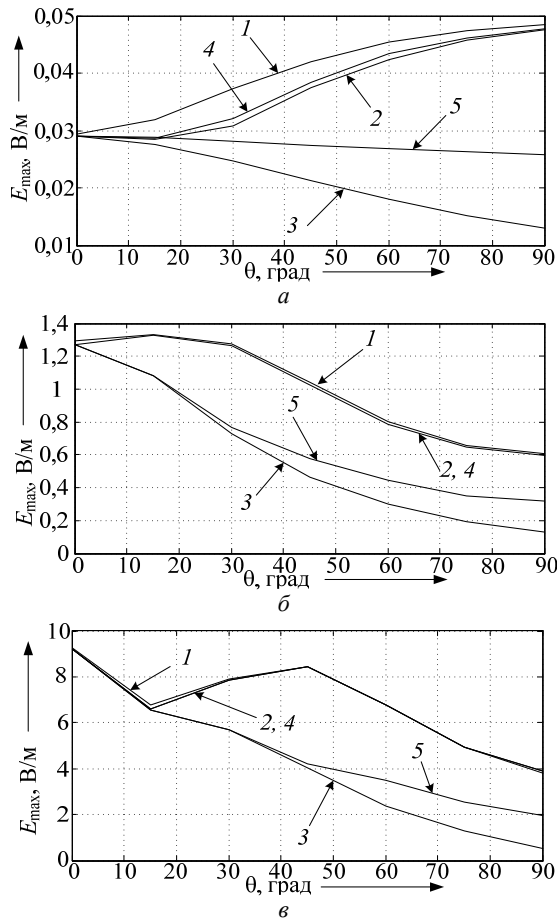


Рис. 6. Зависимости изменения модуля электрического поля от угла падения при частоте: а – 0,2 ГГц; б – 0,8 ГГц; в – 2 ГГц

В процессе моделирования было замечено, что наибольшие значения электромагнитного поля получаются при круговой и вертикальной поляризации, о чем свидетельствует схожесть графиков на рис. 4. Однако наблюдается некоторое различие, которое хорошо заметно на низких частотах (см. рис. 6, а). Видно, что проникающая способность электромагнитного поля круговой поляризации больше, чем у поля эллиптической и вертикальной поляризации. Эта разница заметна на фоне того, что на низкой частоте проникновение поля в экран невелико.

С увеличением частоты уровень электромагнитного поля в целом становится больше, и разница

уменьшается (0,8 ГГц – рис. 6, б). На частоте 2 ГГц (см. рис. 6, в) превышение электрической компоненты поля круговой поляризации над полем вертикальной поляризации заметно лишь в случае падения электромагнитной волны при углах 0–30°. При последующем увеличении частоты графики для круговой и вертикальной поляризации сливаются.

Заключение

По проведенной работе можно сделать вывод, что если вблизи чувствительной радиоэлектронной аппаратуры находится источник высокочастотных электромагнитных помех, тип поляризации электромагнитного поля значительно влияет на эффективность экранирования. Как видно из полученных результатов, наибольшее проникновение характерно для полей круговой и вертикальной поляризации, однако заранее трудно предугадать, будет ли поле с линейной поляризацией ориентировано вертикально или горизонтально по отношению к плоскости экрана. Эффективность экранирования для горизонтальной и вертикальной поляризации может сильно различаться, но поле круговой поляризации будет проникать в экран под любым углом падения. Это следует учитывать при разработке конструктивных мер защиты аппаратуры от внешних электромагнитных полей.

Литература

1. Викторов В.М. Оценка эффективности экранирования импульсных магнитных полей многослойными покрытиями / В.М. Викторов, Р.Ю. Голиков, П.В. Никулин // Технологии ЭМС. – 2016. – № 2 (57). – С. 16–22.
2. Жихарев Д.Ю. Исследование проникновения излучаемых помех во внутренний объем конструкции бортовых приборов космических аппаратов // Технологии ЭМС. – 2016. – № 2 (57). – С. 38–43.
3. Антенны эллиптической поляризации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://besteltd.ru/articl/teoriya_praktika/krugovaya_polyarizatsiya/krugovaya_polyarizatsiya.html. – Заглавие с экрана. – (дата обращения: 12.11.2016).
4. Григорьев, А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2012. – 432 с.
5. Ряполов А.В. Защищенность радиоэлектронных систем к дестабилизирующему воздействию электромагнитных полей / А.В. Ряполов, В.Е. Митрохин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 2 (32). – С. 125.
6. Пименов Ю.В. Техническая электродинамика: учеб. пособие для вузов / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов; под ред. Ю.В. Пименова. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.
7. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: учеб. – СПб.: Лань, 2007. – 704 с.
8. Sullivan D.M. Electromagnetic Simulation Using The FDTD Method / D.M. Sullivan. – New York: Wiley IEEE Press, 2000. – 165 p.
9. Taflov A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Second Edition / A. Taflov, S.C. Hagness. – Boston: Artech House, 2000. – 866 p.

Митрохин Валерий Евгеньевич

Д-р техн. наук, профессор каф. телекоммуникационных,
радиотехнических систем и сетей (ТРСиС)
Омского государственного университета путей сообщения
Тел.: +7 (381-2) 31-06-94
Эл. почта: mitrokhin@list.ru

Бондаренко Константин Александрович

Канд. техн. наук, доцент каф. ТРСиС
Тел.: +7 (381-2) 31-06-94
Эл. почта: gbondarenkok@gmail.com

Ряполов Артем Владимирович

Канд. техн. наук, инженер-исследователь
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина»,
Снежинск
Тел.: +7-909-077-33-06
Эл. почта: a.v.ryapolov@gmail.com

Mitrokhin V.E., Bondarenko K.A., Ryapolov A.V.

Survey of the penetration in shielding enclosure with aperture of electromagnetic field with different polarizations

The article is dedicated to research of electromagnetic field penetration into shielding enclosure through technological aperture. The simulation is performed by the finite-difference time-domain method. Next types of electromagnetic waves polarization are observed: circular, horizontal, vertical and elliptic. A criterion of the penetration is based on the value of electric component of the field in the center of enclosure. Calculations are done depending on the frequency of the field and the angle of propagation. Obtained results demonstrate that in several conditions penetration of the filled with circular polarization prevails on other types of polarization.

Keywords: electromagnetic compatibility, shielding, electromagnetic wave, polarization.