

О ФОРМИРОВАНИИ ОБЛАСТЕЙ С МАЛЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА КОНЕЧНОМ РАССТОЯНИИ ОТ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Пермяков В.А., Корюкин А.Н., Михайлов М.С., Сороковик Д.В.

Московский энергетический институт (Технический университет)

E-mail: Permyakovva@mpei.ru

Поставлена задача формирования неподвижных нулей электрического поля и связанной с ними области с малым значением поля на конечном расстоянии от системы излучателей и намечены пути ее решения. Рассмотрена система $N+M$ параллельных электрических диполей, ортогональных плоскости, в которой находятся их центры. При этом параметры N диполей (координаты центров и дипольные моменты) используются для формирования диаграммы направленности, параметры M диполей – для формирования M нулей электрического поля в плоскости центров диполей. Подробно изучен случай двух диполей. Рассмотрены варианты с большим числом диполей, обобщение предложенного подхода на вибраторы конечной длины, а также возможности формирования нулей магнитного поля. Изложенный подход представляет практический интерес при создании антенных систем, обеспечивающих минимальное значение электрического (магнитного) поля в заданной области пространства, в целях решения задач электромагнитной совместимости, минимизации воздействия поля антенн на человека в системах радиосвязи, уменьшения уровня рассеянного поля от мешающих объектов в системах ближней радиолокации.

В инженерной практике широко используются методы управления положением нулей диаграммы направленности (ДН) антенн, основанные на решении задачи синтеза нулей ДН. Мы предлагаем рассмотреть более общую задачу синтеза нулей электрического (магнитного) поля антенны, расположенных на конечном расстоянии от антенны в любой (ближней, промежуточной, дальней) зоне антенны. Такая постановка представляет интерес в связи с различными приложениями: созданием антенн сотовых телефонов и других средств мобильной связи, в минимальной степени влияющих на пользователя, решением вопросов электромагнитной совместимости антенн, использованием принципов адаптации при отстройке от мешающих сигналов в системах ближней радиолокации.

С физической точки зрения в переменном электромагнитном поле излучающих систем следует различать движущиеся нули электрического и магнитного полей, которые отражают осциллирующий характер поля излучения, и неподвижные нули, которые возникают вследствие интерференции бегущих волн. Ниже мы будем обсуждать только случай реализации неподвижных нулей электрического (магнитного) поля. В трехмерном пространстве неподвижные нули могут формироваться в точках, на линиях или на поверхностях.

В дальней зоне нет различий между положениями нулей электрического и магнитного полей вследствие того, что электромагнитное поле в дальней зоне всегда имеет локальную структуру T волны и компоненты электрического и магнитного полей жестко связаны через импеданс свободного пространства. В промежуточной и ближней зонах излучателя нули электрического и магнитного полей разделяются в пространстве, причем тем сильнее, чем ближе к излучателю. Таким образом, могут быть поставлены задачи синтеза нулей отдельно электрического или магнитного поля, или нулей электрического и магнитного поля вместе.

Следует отметить, что сам факт формирования нулей поля вне дальней зоны хорошо известен. Нули электромагнитного поля в окрестности фокуса оптических устройств и антенн изучались во многих работах, достаточно указать на монографию [1].

а также работы последних лет. Существование нулей в электромагнитных полях сложной структуры следует из асимптотических представлений полей специальными функциями Эйри, Пирси, и более общей теории спецфункций волновых катастроф [2-4].

Однако задача синтеза неподвижных нулей электрического (магнитного) поля в ближней зоне излучателя или системы излучателей возникла сравнительно недавно в связи с проблемой формирования области с минимальным значением поля вблизи антенн сотовых телефонов. Укажем на работу [5], в которой было показана возможность реализации нуля электрического поля на любом расстоянии от системы ортогональных электрического и магнитного диполей при определенном подборе амплитуд и фаз их дипольных моментов. Неподвижный нуль электрического поля в этом случае формируется на прямой, ортогональной плоскости расположения диполей и проходящей через центры диполей. В работе [6] был рассмотрен случай формирования одного неподвижного нуля электрического поля системой из двух параллельных вибраторов конечной длины. В цитированных работах результаты были получены на основе аналитических формул для полей указанных излучателей.

В работах [7,8] был сделан следующий шаг в анализе неподвижных нулей элементарных излучателей: с использованием методов качественного анализа и известных аналитических решений было показано, что системой ортогональных электрического и магнитного диполей может быть сформировано от одного до двух неподвижных нулей электрического поля. Также в [8] была рассмотрена возможность формирования M неподвижных нулей электрического поля системой $N+M$ параллельных электрических диполей и конкретно изучен случай двух диполей. В данном докладе обсуждаются результаты работ [7,8] и их дальнейшее развитие.

Для того, чтобы не усложнять проблему, предположим, что задана система излучателей – электрических и магнитных диполей, взаимодействием между диполями пренебрегаем. В общем случае система N излучателей имеет $6N$ степеней свободы, половина которых определяется дипольными моментами, половина – координатами точек расположения диполей. На эту систему следует наложить два вида требований: 1) требования к ДН системы и 2) координаты точек пространства, в которых векторы электрического или (и) магнитного поля равны нулю. В такой постановке задача синтеза остается достаточно сложной, поэтому для выявления сути дела существенно упростим постановку задачи, отказавшись от требований к синтезу ДН.

Пусть имеется $N + M$ параллельных электрических диполей, расположенных в ограниченной области на различных расстояниях друг от друга. Первые N излучателей используются для формирования начальной ДН, остальные M излучателей - для формирования заданного числа нулей электрического поля в ближней и промежуточной зонах системы. Влияние полей M излучателей на результирующую ДН системы проверяется после определения дипольных моментов M излучателей, обеспечивающих формирование нулей электрического поля. Назовем N излучателей – базовыми, M излучателей – управляющими (рис.1). Будем рассматривать случай гармонического возбуждения диполей. Используем метод комплексных амплитуд, временной множитель $\exp(i\omega t)$.

Далее положим, что центры всех диполей расположены в одной плоскости (x,y) и нули электрического поля формируются также в этой плоскости. Введем декартову и сферическую системы координат, привязанные к одному из базовых диполей. В любой точке плоскости, проходящей через центры диполей, базовые и управляющие диполи будут создавать только компоненты электрического поля E_θ . Для одного диполя в сферической системе координат, связанной с диполем, эта компонента электрического поля равна

$$E_\theta(R, \theta) = AP \sin \theta F(R), \quad F(R) = \frac{\exp(-iR)}{R} \left[1 + \frac{1}{iR} - \frac{1}{R^2} \right], \quad (1)$$

где радиус R – нормированное умножением на волновое число расстояние от начала координат до точки наблюдения, параметр $P=Il$ – дипольный момент, константа A без ограничения общности полагается единице. Условия обращения в нуль электрического поля в M точках плоскости, с учетом того, что $\theta=90^\circ$, приводят к следующей системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно комплексных амплитуд дипольных моментов M диполей

$$\sum_{n=1}^N P_n^b F(R_{nj}) + \sum_{m=1}^M P_m^u F(R_{mj}) = 0, \quad m=1,2,\dots,M \quad (2)$$

В (2) дипольные моменты P_n^b базовых диполей считаются известными, дипольные моменты P_m^u M управляющих диполей неизвестны, заданы координаты точек расположения базовых и управляющих диполей, а также координаты M нулей электрического поля. Таким образом, все расстояния в (2) определены и (2) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) M -ого порядка относительно дипольных моментов управляющих диполей.

Число неизвестных в (2) согласовано с порядком системы, поэтому система (2) имеет решение и притом единственное. На первый взгляд, из последнего утверждения следует, что число нулей электрического поля, определяемых решением системы (2) равно M - числу заданных при формулировке системы (2) положений нулей электрического поля. Однако это предположение ошибочно.

Поясним ситуацию на примере двух диполей. На рис.2 показаны положения двух диполей в плоскости (x,y) и линии уровня – окружности, на которых модули электрического поля двух диполей равны друг другу. Если окружности пересекаются, то подбором фаз дипольных моментов в этих точках можно скомпенсировать поля диполей и получить неподвижный нуль полного электрического поля. Из рис.2 следует, что возможны 4 случая, из которых два – являются общими, два – частными. Общие случаи: окружности не пересекаются (нулей нет, рис.2а), окружности пересекаются в 2-х точках, причем эти точки либо находятся в полосе между диполями (рис.2б), либо вне этой полосы справа (или слева) от диполей (рис.2в). Частный случай: окружности касаются в одной точке, при этом точка касания находится либо между центрами диполей (рис.2г), либо на продолжении прямой, соединяющей центры диполей (рис.2д). Наконец, возможен исключительный случай, когда нули поля расположены точно на плоскости симметрии системы: на рис.2е - это прямая, проходящая перпендикулярно отрезку, соединяющему центры диполей, через его середину. Последний случай соответствует расположению диполя над идеально проводящей плоскостью, что эквивалентно ее замене зеркальным источником. Таким образом, с учетом симметрии системы и расположения точек нулевого поля число нулей электрического поля для данной системы диполей может принимать следующие значения: 0,1,2, ∞ .

На рис. 3 показаны три случая, когда в системе двух диполей формируются нули электрического поля на плоскости (рис.3а), в одной (рис.3б) или двух (рис.3в) точках. Практический интерес представляют случаи, когда реализуются один или два нуля.

Обсудим теперь случай трех диполей, причем два диполя будем использовать, как управляющие для формирования нулей. В этом случае не удастся реализовать наглядный графический анализ вариантов формирования нулей, аналогичный рассмотренному выше для двух диполей. Однако из соображений симметрии можно указать варианты расположения нулей поля, при которых число нулей вследствие симметрии больше числа управляющих диполей. Соответствующие примеры приведены на рис. 4, на котором показаны варианты реализации нулей электрического поля тремя диполями с числом нулей от 4-х до 2-х.

Аналогично были рассмотрены случаи реализации большего числа нулей электрического поля.

Таким образом, на основе разобранных примеров можно сделать вывод, что число S нулей поля, определяемых решением системы (2) с M управляющими диполями, подчиняется условию $S \geq M$.

Предложенный подход обобщается на случаи формирования нулей электрического (магнитного) поля системой элементарных излучателей и нулей электрического (магнитного) поля системой параллельных вибраторов конечной длины, причем нули поля могут располагаться произвольным образом относительно излучателей. Соответствующие СЛАУ для компонент полей имеют вид, аналогичный (2), с той разницей, что они носят векторный характер и записываются в декартовой системе координат. В них используются известные аналитические выражения для компонент электрического (магнитного) поля вибраторов. В частности, проведенный выше наглядный анализ формирования нулей электрического поля системой из двух параллельных электрических диполей полностью переносится на случай определения нулей электрического (магнитного) поля двух параллельных вибраторов

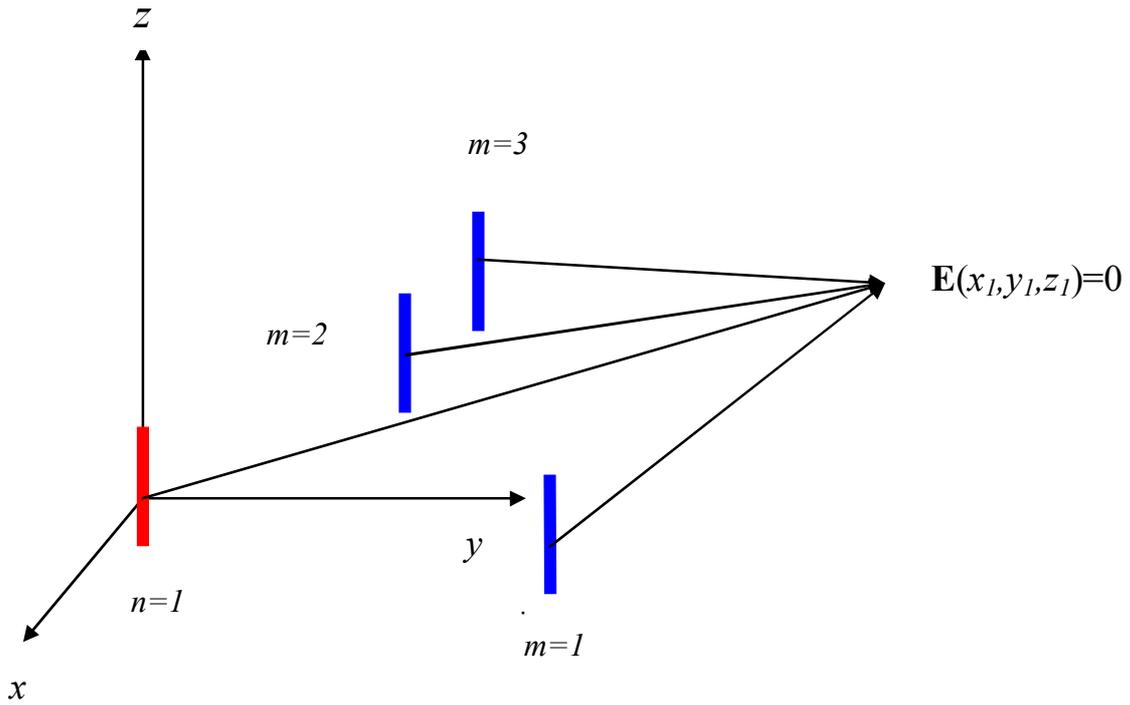


Рис.1. Постановка задачи о формировании нуля электрического поля системой параллельных диполей. Показаны один базовый и три управляющих диполя

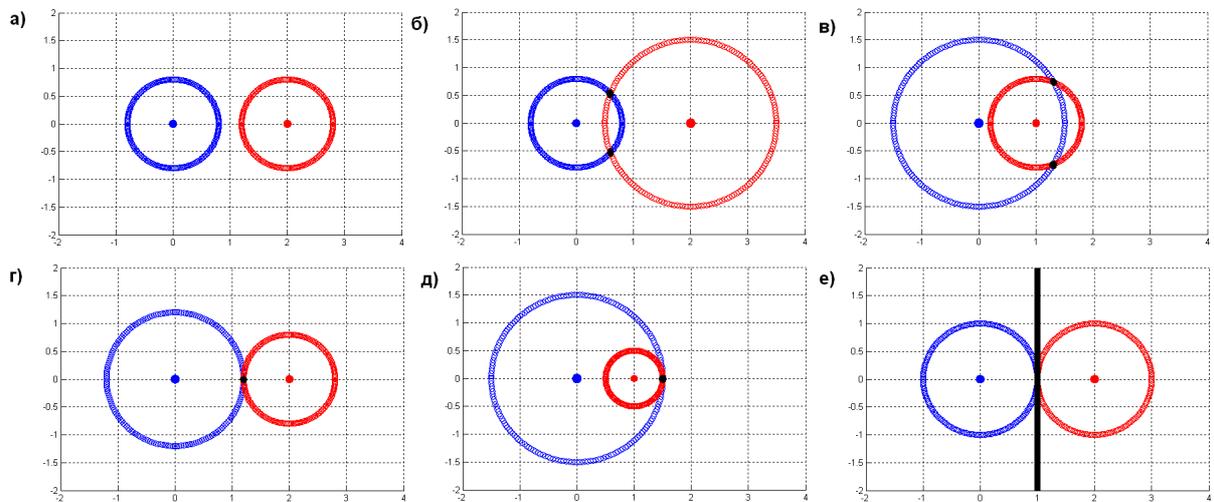


Рис. 2. Анализ формирования нулей электрического поля системой из двух диполей.

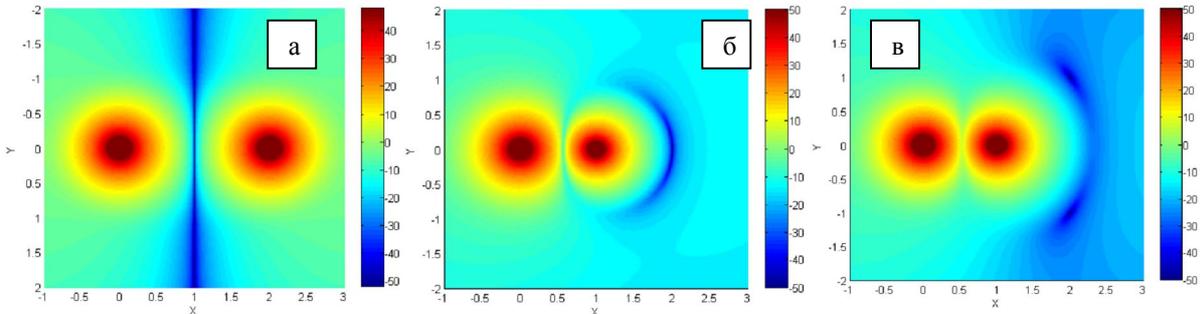


Рис. 3 Картины формирования нулей электрического поля двумя диполями: а) бесконечное число нулей (в плоскости), б) один нуль, в) два нуля

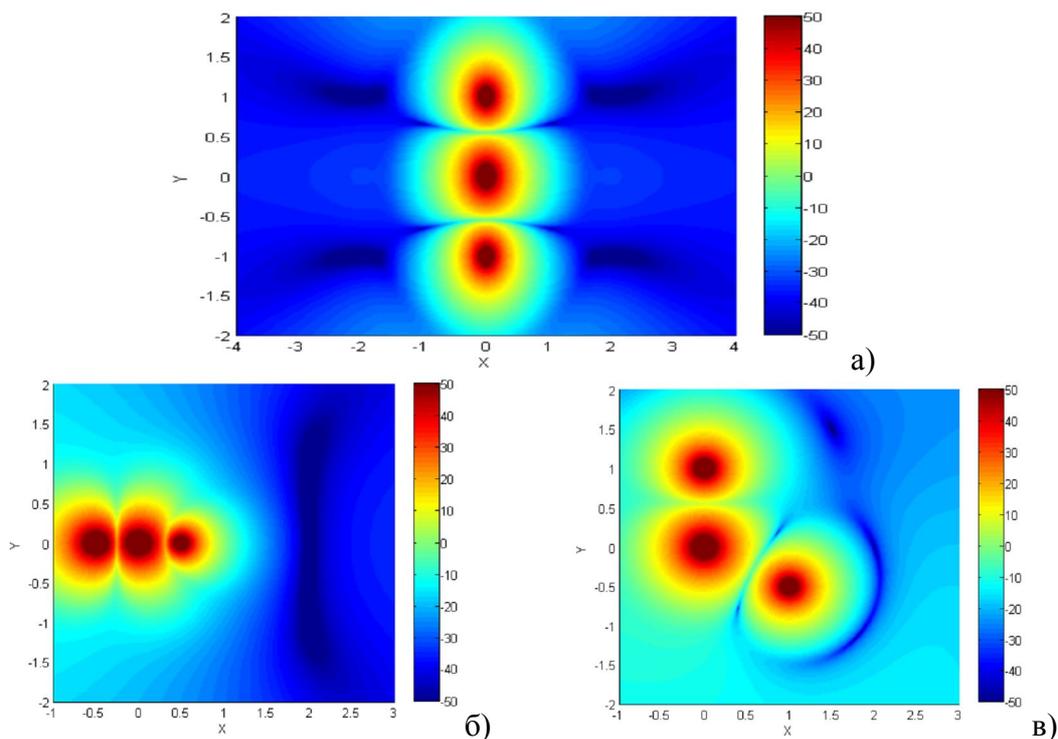


Рис. 4 Картины формирования нулей электрического поля тремя диполями:
 а) 4 нуля, б) три нуля, в) два нуля

конечной длины. Конкретные расчеты в случае системы вибраторов были проведены с использованием известных выражений для электрического поля тонких вибраторов конечной длины, приведенных в [9,10].

Отметим, что результаты, полученные для электрических излучателей, переносятся на случай магнитных излучателей с использованием принципа перестановочной двойственности.

Предложенная методика формирования области с малым значением электрического (магнитного) поля представляет интерес при разработке антенн сотовых телефонов и других мобильных средств связи, обеспечивающих минимальное воздействие электромагнитного поля на пользователя.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1979, 856 с.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, 343 с.
3. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980, 304 с.
4. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Палкин Е.А. Специальные функции волновых катастроф. Препринт. /ИРЭ РАН СССР. –М.: 1984, №43 (415), 75 с.
5. Пермяков В.А., Голобородько А.С. Структура электромагнитного поля ортогональных электрического и магнитного диполей с произвольным соотношением токов. / Вестник МЭИ, 1999, № 5, с. 49-53
6. Каценеленбаум Б.З., Левин Б.М. Синтез антенн с областью малого поля в ближней зоне. Антенны, №6(97), 2005, с. 38-46.
7. Пермяков В.А., Корюкин А.Н. Качественный анализ электромагнитных полей обобщенного элемента Гюйгенса. /Нелинейный мир, 2008, т.6, № 4, с.296-299.
8. Корюкин А.Н. Качественный анализ электромагнитных полей простых антенн. /Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. М.: МЭИ(ТУ), 2008.
9. Стреттон Дж.А. Теория электромагнетизма. ОГИЗ-ГОСТЕХИЗДАТ, М-Л, 1948, 540 с.
10. Марков Г.Т. Антенны. М.: ГЭИ, 1960, 535 с.