УДК 621.396.67:537.8 (07)

ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА БАШНЕ

М.С. Воробьев, доцент кафедры «Цифровые радиотехнические системы» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), к.т.н.
Л.П. Кудрин, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ЮУрГУ, к.т.н.
А.П. Медведев, директор филиала «Челябинский ОРТПЦ» ФГУП «РТСР»
А.Б. Хашимов, доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ЮУрГУ, к.ф.-м.н.; xab@kipr.susu.ac.ru

Для заданных требований к диаграмме направленности разработан метод расчета поля излучения в дальней зоне антенной системы, состоящей из двух коаксиальных вибраторов вертикальной поляризации диапазона 94–100 МГц, с учетом влияния элементов башни. Предложена строгая математическая модель антенной системы на основе интегральных уравнений Поклингтона. Электромагнитное поле рассеяния от элементов башни определяется с помощью системы интегральных уравнений I рода. Эффективные численные методы исследования разработанной математической модели позволяют оптимизировать расположение антенной системы относительно заданной конфигурации сечения башни.

Ключевые слова: *диаграмма направленности, поле рассеяния, симметричный коаксиальный вибратор.*

Характерными особенностями антенных систем (АС) метрового диапазона, располагаемых на башнях, являются, во-первых, ограниченное число вариантов размещения, во-вторых, сложность учета влияния элементов башни (пояса, кабельросты, мостики) на диаграмму направленности (ДН) АС. В наибольшей степени эти особенности проявляются при формировании ДН специальной формы, когда необходимо значительно уменьшить плотность потока мощности электромагнитного поля излучения в заданных угловых направлениях или секторах. Это требуется для снижения уровня взаимных помех АС, работающих в перекрывающихся диапазонах частот и зонах обслуживания. В этом случае синтез оптимальной ДН должен как можно более точно учитывать влияние помеховых полей рассеяния, вызванных дифракционным взаимодействием АС и элементов башни.

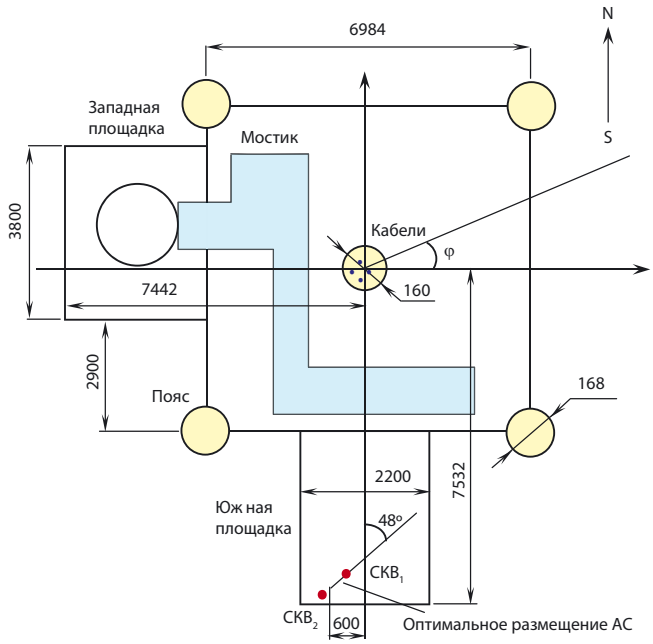

Рис. 1. **Конфигурация сечения башни на отметке 96 м**

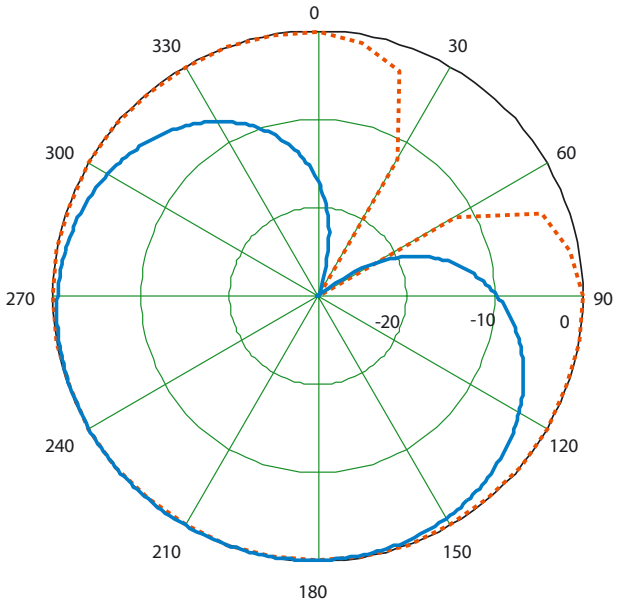

Рис. 2. **Требуемая ДН (штриховая линия) и идеализированная ДН (сплошная линия), логарифмический масштаб**

Рассмотрим следующую задачу: разработать АС вертикальной поляризации, диапазон частот 94—100 МГц, место установки — одна из площадок башни ОРТПЦ на отметке 96 м, сечение башни показано на рис. 1. Требования к ДН: сформировать в горизонтальной плоскости ДН, максимально приближенную к равномерной, за исключением сектора азимутальных углов 30°–60°, в котором необходимо обеспечить возможно большее подавление плотности потока мощности поля излучения. Требуемая ДН показана на рис. 2.

Как известно, полоса частот АС обеспечивает возможность одновременной работы трех радиостанций при помощи фильтров сложения на входе фидера. Существуют различные варианты формирования ДН заданного вида — с помощью панельных излучателей или системы коллинеарных вибраторов [1]. Ограниченные размеры площадок возможного размещения АС (западная или южная, рис. 1) обусловили выбор симметричных коаксиальных вибраторов (СКВ), так как они отвечают требованиям по компактности и механической прочности конструкции, высокой надежности, удобству защиты узла возбуждения от внешних факторов. При этом одним из базовых вариантов построения АС может служить система из двух СКВ, расстояние между осями которых $d = \lambda/4$ (λ — длина волны, соответствующая центральной частоте диапазона); комплексные амплитуды возбуждения вибраторов $U_1 = U_0$; $U_2 = U_0 \exp(i\pi/2)$. Тогда ДН в горизонтальной плоскости определяется выражением [2]:

$$F(\varphi) = F_{\max}\left[1 + \exp\left(i\left[kd\sin\varphi + \pi/2\right]\right)\right], \qquad (1)$$

где $F_{\max}$ — нормирующий множитель, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. В этом случае ДН АС кардиоидного вида достаточно хорошо соответствует заданной ДН (рис. 2), так как удается достичь практически полного подавления плотности потока мощности поля излучения в секторе углов $30° < \varphi < 60°$. Вместе с тем, близкое расположение двух СКВ приводит к заметному рассогласованию АС, вызванному их взаимным влиянием. Обеспечение ДН заданного вида в достаточно широкой полосе частот приводит к необходимости использования строгих электродинамических соотношений для построения математической модели (ММ) АС с учетом влияния элементов башни.

Для рассмотрения характеристик вибраторных излучателей широко применяется метод интегрального уравнения (ИУ) Поклингтона в тонкопроволочном приближении [3]. Конструкция СКВ позволяет выбирать соотношение диаметров внешнего цилиндрического плеча и внутреннего проводника коаксиальной линии, выступающего в роли несущей стойки СКВ, которое обеспечивает необходимое волновое сопротивление эквивалентной коаксиальной линии. Разработанная конструкция СКВ имеет диаметр внешнего цилиндрического плеча $2a = 120$ мм, поэтому в заданном диапазоне частот отношение $a/\lambda = 0{,}018\ldots0{,}02$ является граничным для тонкопроволочного приближения и требует детального изучения сходимости и корректности численного решения ИУ.

Введем ИУ Поклингтона

$$\int_{-L/2}^{L/2} I(z')\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right)G(z - z')dz' = -4\pi i\omega\varepsilon_a E_{in}(z), \qquad (2)$$

где свойства ядра определяются функцией $G(z - z') = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\exp(-ikr)}{r}d\varphi'$; $r = \sqrt{(z - z')^2 + 2a^2(1 - \cos\varphi')}$; z, z' — координаты точек наблюдения и источника на поверхности СКВ, ориентированного параллельно оси z; L — длина СКВ. Важную роль при разработке ММ играет выбор источника возбуждения СКВ. Существующие методы аппроксимации функции распределения напряженности электрического поля в зазоре СКВ показывают, что выбор источника излучения в виде кольцевого магнитного тока [4] хорошо подходит для рассматриваемого случая, так как форма зазора СКВ полностью соответствует геометрии такого источника. Введем функцию возбуждения СКВ вида:

$$E_i(z) = \frac{U_0}{\ln b/a}\left[\exp(-ikR_a)/R_a - \exp(-ikR_b)/R_b\right], \qquad (3)$$

где U_0 — амплитуда напряженности электрического поля в зазоре; $R_a = \sqrt{z^2 + a^2}$; $R_b = \sqrt{z^2 + b^2}$; a, b — радиусы внешнего и внутреннего проводника коаксиальной линии СКВ.

Использование метода моментов для численного решения ИУ (2) требует высокой степени точности аппроксимации ядра ИУ при совпадении переменных $z = z'$. С этой целью используем рекуррентные соотношения для вычисления эллиптических интегралов I и II рода, к которым можно привести выражения (2). Адаптивная итерационная процедура позволяет получить относительную точность вычислений ядра $\sim 10^{-9}$. Критерием устойчивости и корректности решения ИУ может служить регулярный характер изменения входного сопротивления вибратора для возрастающих значений a. Результаты решения показывают устойчивые величины входного сопротивления СКВ для значений a/λ до 0,024.

В работе [5] показано, что одним из критериев корректности численного решения задачи определения входного сопротивления в заданной полосе частот является баланс мощности излучения и подводимой к СКВ мощности внешнего источника. При этом расчеты показывают хорошее соответствие полученных результатов для рабочей поляризации поля излучения.

Кроме того, проводилось исследование числа обусловленности матрицы ИУ, поведение которого отражает устойчивость численного решения системы линейных алгебраических уравнений. Для заданного параметра a/λ отмечается монотонный характер поведения числа обусловленности в зависимости от общего числа интервалов дискретизации длины СКВ. Это также подтверждает корректность решения ИУ Поклингтона с заданными электрическими размерами СКВ.

В результате решения ИУ (2) были получены следующие значения входного сопротивления СКВ: $z_{вх} = 94{,}75 + i11{,}86$ Ом на частоте $f = 94$ МГц; $z_{вх} = 97 + i15{,}63$ Ом, $f = 97$ МГц; $z_{вх} = 101{,}54 + i19{,}11$ Ом, $f = 100$ МГц. Экспериментальные исследования образца СКВ, проведенные с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи «Обзор-103», показали хорошее соответствие с теоретическими результатами. Следовательно, с помощью предложенной ММ СКВ можно рассчитать входное сопротивление с достаточно высокой точностью в диапазоне частот. Это дает возможность прогнозировать основные характеристики СКВ на этапе предварительного проектирования АС без изготовления макета для экспериментальных исследований. Кроме того, заранее известны характеристики согласующего узла в заданном частотном диапазоне.

Согласование СКВ с коаксиальным кабелем возбуждения РК75–7–21 производилось путем введения в область зазора специальных рассредоточенных емкостных элементов на стеклотекстолитовой подложке. Это позволило получить значение коэффициента стоячей волны $K_{стU} \le 1{,}18$ во всем рабочем диапазоне. Для построения АС, обеспечивающей заданную ДН, использовались два согласованных СКВ (СКВ$_1$

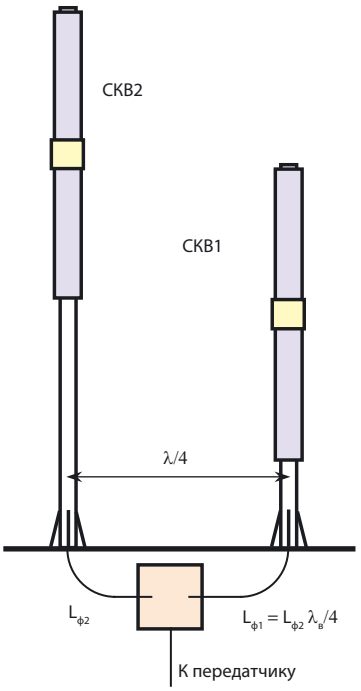

Рис. 3. **Геометрия АС**

и $СКВ_2$) и широкополосный делитель 1/2. Для получения необходимого фазового сдвига между комплексными амплитудами возбуждения АС длины кабелей к $СКВ_1$ и $СКВ_2$ отличаются на величину $\lambda_в/4$. Экспериментальные исследования варианта АС, когда центры вибраторов находятся на прямой, перпендикулярной их осям, показали, что взаимное влияние приводит к заметному рассогласованию АС ($K_{стU} > 1{,}45$ на входе делителя). В связи с этим для наибольшего снижения взаимного влияния $СКВ_1$ и $СКВ_2$ были разнесены в пространстве (рис. 3). Для данного варианта построения АС во всем рабочем диапазоне $K_{стU} \le 1{,}2$, что соответствует требованиям технического задания на разработку АС.

Для расчета ДН АС в горизонтальной плоскости с учетом влияния поясов башни и параллельных им фидеров, расположенных внутри башни, были использованы результаты работы [6]. В ней показано, что поле излучения в горизонтальной плоскости пространственной системы параллельных вибраторов, установленных вблизи протяженных металлических цилиндров (оси вибраторов параллельны осям цилиндров), эквивалентно полю излучения системы нитей электрического тока, расположенных вблизи идеально проводящих, бесконечно протяженных цилиндров. Это означает принципиальную возможность перехода от решения векторной трехмерной задачи к решению значительно более простой скалярной двухмерной задачи (*E*-поляризации). В этом случае учитывается только конфигурация сечения башни на отметке 96 м. Необходимо подчеркнуть, что этот метод имеет принципиальные ограничения и позволяет рассчитать ДН АС в дальней зоне с учетом влияния элементов башни только для горизонтальной плоскости.

Известная геометрия сечения башни на заданной высоте установки АС (рис. 1), позволяет сформировать ММ второго этапа задачи. Для *E*-поляризации введем следующее ИУ I рода [4]:

$$\int_L j_z^s(q) H_0^{(2)}\left(kr_{pq}\right) dl_q = -\left[I_{z1} H_0^{(2)}\left(kr_{1p}\right) + I_{z2} H_0^{(2)}\left(kr_{2p}\right)\right], \quad (4)$$

где L — общий контур, образованный сечением поясов и элементов башни в плоскости размещения АС; j_z^s — амплитудно-фазовое распределение токов на контуре, определяющих поле рассеяния; $p,q \in L$ — координаты точки наблюдения и источника, соответственно; r_{1p}, r_{2p} — расстояния от $СКВ_1$ и $СКВ_2$ до точки наблюдения на контуре L, соответственно; I_{z1}, I_{z2} — АФР токов возбуждения $СКВ_1$ и $СКВ_2$; $H_0^{(2)}(kr)$ — функция Ганкеля второго рода нулевого порядка для соответствующего аргумента. Разработанная ММ позволяет на основе высокоэффективного численного метода решения ИУ (4) рассматривать различные варианты размещения АС относительно элементов башни. Численные эксперименты показали, что размещение АС на западной площадке не обеспечивает требуемой ДН в горизонтальной плоскости, так как поле рассеяния в заданном секторе подавления имеет высокий уровень (до −8 дБ). Математическое моделирование АС, размещенной на южной площадке, позволило выбрать оптимальную область для размещения АС, отвечающую критериям заданной ДН. На рис. 4 представлены результаты расчета ДН, соответствующие оптимальному размещению АС. Необходимо отметить, что проверка оптимальности размещения должна предусматривать контроль точности и устойчивости численного решения ИУ (4). С этой целью были произведены расчеты ДН для АС, размещаемой в ограниченной области, окружающей оптимальную точку. Все расчеты показали стабильность ДН,

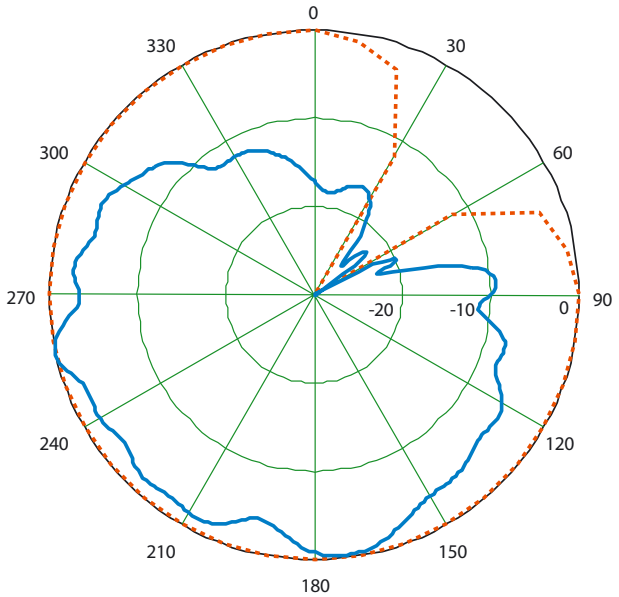

Рис. 4. **Требуемая ДН (штриховая линия) и оптимизированная ДН (сплошная линия), логарифмический масштаб**

подтверждающие оптимальный результат. Для математического моделирования АС использовался суперкомпьютер «СКИФ Урал», установленный в Южно-Уральском государственном университете. Время расчетов одного варианта размещения АС не превышает 34 с.

Выбранное положение АС показано на рис. 1. Конструктивно АС смонтирована на индивидуальном основании, позволяющем при монтаже перемещать АС по площадке относительно башни в небольших пределах, что особенно важно при окончательной настройке АС.

После монтажа АС на башне ОРТПЦ были произведены контрольные замеры напряженности поля для проверки соответствия расчетных и действительных ДН. Особые требования к зоне подавления поля излучения АС объясняются необходимостью совместной работы с местной телевизионной вещательной станцией 5-го канала (92—100 МГц), расположенной на расстоянии 76 км от башни ОРТПЦ г. Челябинска. Контрольные замеры уровня сигнала АС в указанной полосе частот в заданной зоне подавления показали практически полное отсутствие непреднамеренных радиопомех приему сигналов телевизионного вещания — уровень сигнала не превышает 2 дБмкВ, измеренное защитное отношение — не менее 48 дБ при нормируемом значении 46 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Г. А. Ерохин, О. В. Чернов, Н. Д. Козырев, В. Д. Кочержевский — М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 496 с.
2. **Сазонов Д. М**. Антенны и устройства СВЧ.— М.: Высшая школа, 1988.— 432 с.
3. **Sophocles J. Orfanidis**. Electromagnetic Waves and Antennas.— 2008. ~ www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa.
4. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Митры Р.— М.: Мир, 1977.— 487 с.
5. **Бузова М. А., Юдин В.** В. Методика расчета входного импеданса проволочной антенны на основе уравнения баланса энергии // Антенны. — 2004.— № 3.— С. 31—36.
6. **Войтович Н. И., Хашимов А. Б.** О соответствии асимптотических решений двумерных и трехмерных задач в антенной технике // Радиотехника и электроника.— Т. 55.— 2010.— № 12.— С. 1471—1476.

Получено после доработки 20.08.12.