

**ВЗАИМНЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ АНТЕННАМИ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫМИ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РАДИОТЕЛЕСКОПА
ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН**

Введение

В формировании характеристик фазированных антенных решеток (ФАР) большую роль играют взаимные связи между их элементами, поэтому в литературе их исследованию уделяется очень большое внимание [1, 2]. Основные свойства взаимных связей между излучателями, наиболее часто применяемых в качестве элементов ФАР, достаточно хорошо изучены. К ним относятся линейные вибраторы и щели, рупорные антенны и открытые концы волноводов, микрополосковые патч-антенны и др. [2]. Однако в связи с быстрым развитием техники сверхширокополосной связи, радиолокации, радиоастрономии появилась потребность в новых излучателях с улучшенными параметрами, которые могли бы служить элементами ФАР, работающих в широком диапазоне частот, и удовлетворять новым условиям эксплуатации. Одной из областей приложения новейших разработок антенн в последнее десятилетие стала низкочастотная радиоастрономия, занимающаяся изучением свойств радиоисточников внеземного происхождения в диапазоне частот 10 – 100 МГц [3]. Мощным стимулом для ее стремительного развития стало появление новых высокочувствительных приемных устройств [4, 5] и высокопроизводительной компьютерной техники для цифровой обработки сигналов. В целом ряде стран начали проектировать и строить новые гигантские радиотелескопы для работы в этом диапазоне частот, среди которых следует назвать LOFAR [6] (Европейский Союз), LWA [7] (США), LSS [8] (Франция), ГУРТ (Украина) [9]. В качестве сенсоров в них предполагается использовать многоэлементные ФАР, сектор сканирования луча которых будет охватывать почти всю небесную полусферу. Уже разработаны новые типы антенн – элементов этих ФАР, которые смогут эффективно функционировать в диапазоне частот с коэффициентом перекрытия 7-8 и обеспечивать широкий угол обзора радиотелескопа, находясь в непосредственной близости от поверхности земли. Хотя в процессе проектирования были проведены многочисленные исследования их параметров и характеристик, некоторые их свойства оказались еще недостаточно изучены. Это касается, в первую очередь, взаимных связей между ними, которые непременно возникнут при объединении их в решетку. В настоящей работе сделаны первые шаги по заполнению этого пробела. Она посвящена изучению взаимных сопротивлений между антеннами, используемых в качестве элементов ФАР нового перспективного радиотелескопа ГУРТ, предназначенного для работы в диапазоне частот 10 – 70 МГц.

Постановка задачи

На рис. 1, *a* схематически изображен чертеж антенны, которая используется в качестве элемента решетки радиотелескопа ГУРТ [14]. Она представляет собой плоский симметричный вибратор с наклонными плечами, изготовленный из тонкостенных медных трубок диаметром 12 мм. Точка его питания А расположена в центре проводника, соединяющего плечи, и находится на высоте $h=1,6$ м над поверхностью земли. Полная длина плеча вибратора вдоль средней трубки (ломаная линия АВС на рис.1, *a*) равна 1,4 м, а угол γ ее наклона по отношению к горизонту составляет 45° .

Секция ФАР ГУРТ представляет собой регулярную квадратную решетку из 5×5 крестообразных элементов (рис. 1, *b*), каждый из которых состоит из двух ортогональных плоских вибраторов (рис. 1, *a*) с независимыми входами, закрепленных на общей стойке. Всего, таким

образом, в секции используются 50 плоских вибраторов, 25 из которых принимают электромагнитные волны одной линейной поляризации, а остальные 25 – ортогональной поляризации. Поскольку сигналы, принимаемые каждой из этих двух групп вибраторов, собираются с помощью собственной схемы суммирования и подаются на вход своего приемника для дальнейшей обработки, секцию ФАР можно рассматривать как совокупность двух отдельных совмещенных решеток, предназначенных для приема электромагнитных волн двух ортогональных поляризаций. Шаг этих решеток вдоль обеих осей одинаков $d_x = d_y$ и равен 3,75 м.

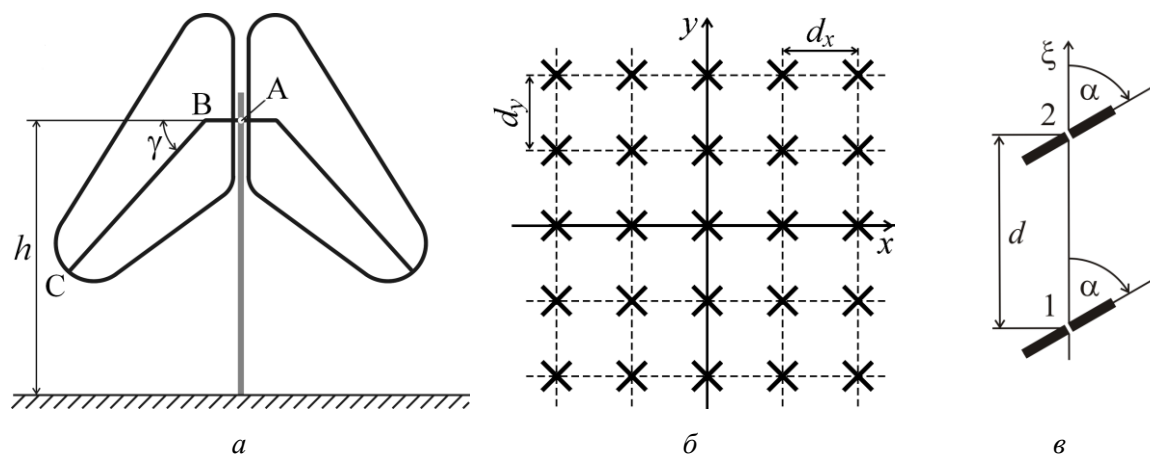


Рис. 1

Поставим себе задачу исследовать зависимости собственных и взаимных сопротивлений между двумя одинаково поляризованными плоскими вибраторами (рис.1, а) от их взаимной ориентации, расстояния между ними и частоты. На рис.1, в схематически показана пара исследуемых вибраторов, где угол α задает их поворот относительно оси ξ , проходящей через их фазовые центры. Исследование взаимодействия ортогонально поляризованных вибраторов выходит за рамки настоящей работы.

Методика исследования

Токи и напряжения на клеммах двух произвольных излучателей можно связать системой линейных уравнений:

$$\dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2, \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2, \quad (2)$$

где $\dot{U}_{1,2}, \dot{I}_{1,2}$ – комплексные амплитуды напряжений и токов на клеммах первого и второго излучателей соответственно; Z_{11} и Z_{22} – собственные сопротивления 1-го и 2-го излучателей, Z_{12}, Z_{21} – взаимные сопротивления между излучателями.

Если излучатели идентичны, а материал, из которого они изготовлены, и окружающая среда изотропны, то соблюдаются равенства $Z_{21} = Z_{12}$ и $Z_{22} = Z_{11}$. В этом случае уравнения (1) и (2) эквивалентны, и для определения собственных и взаимных сопротивлений можно использовать равенства:

$$Z_{22} = Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0} \quad \text{и} \quad Z_{12} = Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2=0}. \quad (3)$$

Собственное сопротивление излучателя численно равно его входному сопротивлению в присутствии второго с разомкнутыми входными клеммами, а взаимное – наведенному сопротивлению из одного излучателя в другой при одинаковых токах на их клеммах.

Если взаимодействующие излучатели имеют джоулевы потери, то для полного описания их свойств необходимо знать еще собственные $R_{\Sigma 11}$ и взаимные $R_{\Sigma 21}$ сопротивления излучения [10], которые являются мерой излучаемой мощности и определяются как [11, 12]:

$$R_{\Sigma 11} = \frac{Z_0}{4} \frac{\ell_{д1}^2}{\lambda^2} \oint_{\Omega} |\vec{F}_1(\theta, \varphi)|^2 \cdot \sin \theta d\theta d\varphi, \quad R_{\Sigma 21} = \frac{Z_0}{4} \frac{\ell_{д2} \ell_{д1}}{\lambda^2} \oint_{\Omega} (\vec{F}_2^*(\theta, \varphi) \cdot \vec{F}_1(\theta, \varphi)) \cdot \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (4)$$

где $\ell_{дn}$ и $\vec{F}_n(\theta, \varphi)$ – действующая длина и нормированная ($\max |\vec{F}_n(\theta, \varphi)| = 1$) диаграмма направленности (ДН) одного из излучателей ($n = 1, 2$), которые определяются в присутствии другого с разомкнутыми входными клеммами; Z_0 – характеристическое сопротивление свободного пространства; λ – длина волны в свободном пространстве; $\Omega = 4\pi$, если решетка расположена в свободном пространстве, и $\Omega = 2\pi$, если она находится над экраном.

Таким образом, для нахождения собственных взаимных сопротивлений пары связанных вибраторов необходимо решить две электродинамические задачи о поочередном возбуждении их токами \dot{I}_1 и \dot{I}_2 в присутствии другого с разомкнутыми входными клеммами, каждый раз определяя напряжения на обоих входах \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , а также соответствующие таким возбуждениям ненормированные ДН $\vec{F}_{1,2}(\theta, \varphi) = (\ell_{д1,2}/\lambda) F_{1,2}(\theta, \varphi)$. В настоящее время для их решения можно воспользоваться специализированными компьютерными программами численного электродинамического моделирования антенн. Среди них можно выделить программу NEC2 [13], основанную на методе моментов и разработанную специально для численного анализа проволочных антенн произвольной геометрии. Эта программа хорошо зарекомендовала себя при моделировании проволочных антенн разнообразных конфигураций и, что очень важно в нашем случае, позволяет корректно учитывать влияние реальной земли на их параметры. Кроме того, она является некоммерческой программой, доступной для широкого круга пользователей, так как имеет открытые исходные коды и свободно распространяется в Интернете [14, 15].

Результатом моделирования проволочной антенны в программе NEC2 является распределение токов на всех ее сегментах, входные сопротивления относительно возбужденных клемм, а также ненормированная векторная ДН $\vec{F}(\theta, \varphi)$, соответствующая выбранному способу возбуждения. К сожалению, эта программа не позволяет рассчитывать ЭДС, наводимые на разомкнутых клеммах антенны, однако режим холостого хода на выбранном входе можно имитировать, подключая к нему сопротивление R_L , на несколько порядков большие, чем ее входное сопротивление. Такой прием позволяет находить ток I_R в сопротивлении R_L и, следовательно, рассчитывать падения напряжения на нем $U_R = R_L I_R$, которое практически не отличается от значений ЭДС, наведенной на разомкнутом входе.

Результаты моделирования

Анализ взаимных сопротивлений между исследуемыми вибраторами выполнялся в диапазоне частот от 10 до 80 МГц, где их электрические длины изменяются от $0,09\lambda$ до $0,65\lambda$. На рис.2, а, б сплошной линией показана зависимость входного сопротивления $Z_{11}(f)$ одиночного вибратора от частоты, где наблюдаются его два резонанса: на 45 МГц – последовательный, а в окрестности 77 МГц – параллельный. В связи с этим данный частотный диапазон можно условно разбить на три отрезка: нижний – от 10 до 45 МГц, средний – от 45 до 60 МГц и верхний – от 60 до 80 МГц.

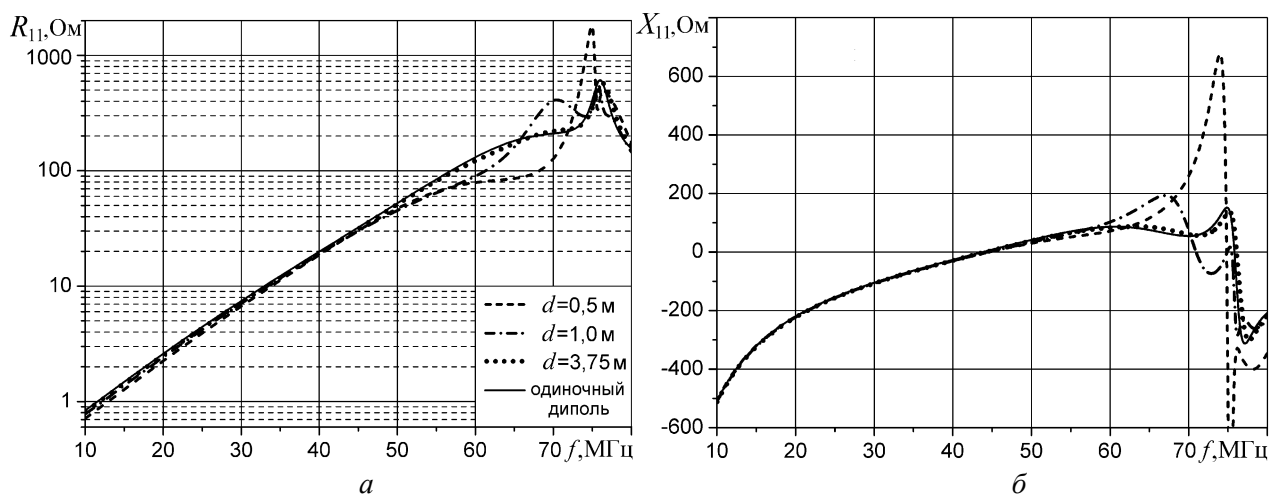


Рис. 2

Появление вблизи одиночного вибратора любого предмета, рассеивающего электромагнитные волны, неизбежно должно приводить к изменению его входного сопротивления. Такое явление наблюдаем на рис.2, где показаны частотные характеристики исследуемого вибратора в присутствии второго такого же вибратора с разомкнутыми входными клеммами, расположенного параллельно ему ($\alpha = 90^\circ$, см. рис.1, а) на расстояниях $d = 0,5$ м; $d = 1,0$ м и $d = 3,75$ м. На нижнем частотном отрезке эти вибраторы по своим свойствам близки к каноническим минимально рассеивающим антеннам [16], которые при размыкании их клемм совсем не рассеивают электромагнитное поле. Поэтому приближение к исследуемому вибратору второго разомкнутого (вплоть до расстояний в несколько сотых длины волны) практически не изменяет его характеристики, что хорошо видно на рис. 2, а, б. На верхнем частотном отрезке поведение собственных сопротивлений вибраторов резко контрастирует с тем, что наблюдалось на нижнем. Здесь длины плеч вибраторов приближаются к резонансным, поэтому они интенсивно рассеивают волны даже в режиме холостого хода. Однако на расстояниях, больших одной длины волны, связь между ними невелика, поэтому их сопротивления Z_{11} и Z_{22} остаются практически не отличимыми от входного сопротивления одиночного вибратора. Об этом свидетельствует пунктирная кривая на рис.2, построенная для расстояния $d = 3,75$ м, равного шагу решетки секции ГУРТ (рис.1, б). Если же вибраторы сближаются до расстояний, меньших 2 м (вблизи параллельного резонанса это не более $0,5\lambda$), то связь между ними на верхнем частотном отрезке оказывается настолько сильной, что величины их сопротивлений Z_{11} и Z_{22} могут изменяться в несколько раз. Средний частотный отрезок является переходным, поэтому в его начале изменения кривой $Z_{11}(f)$ при сближении вибраторов практически незаметны, а ближе к его концу сопротивление R_{11} может падать даже вдвое. Необходимо отметить, что участок частот от 70 до 80 МГц, где наблюдаются наибольшие изменения частотной характеристики собственных сопротивлений вибраторов при их сближении, выходит за рамки рабочего диапазона радиотелескопа ГУРТ, а рассмотрен здесь исключительно для того, чтобы понять поведение параметров исследуемых вибраторов на верхних частотах.

Поскольку на большей части рабочего диапазона исследуемый вибратор по своим свойствам близок к каноническим минимально рассеивающим антеннам, классическим представителем которых является элементарный электрический излучатель (диполь Герца), последний мы будем рассматривать как некий эталон для сравнения. На рис. 3 показаны зависимости полного взаимного сопротивления $z_{21}(d) = r_{21}(d) + jx_{21}(d)$ и взаимного сопротивления

излучения $r_{\Sigma 21}(d)$ между двумя идентичными горизонтальными диполями Герца от расстояния между ними, нормированные к реальной части сопротивления Z_{11} .

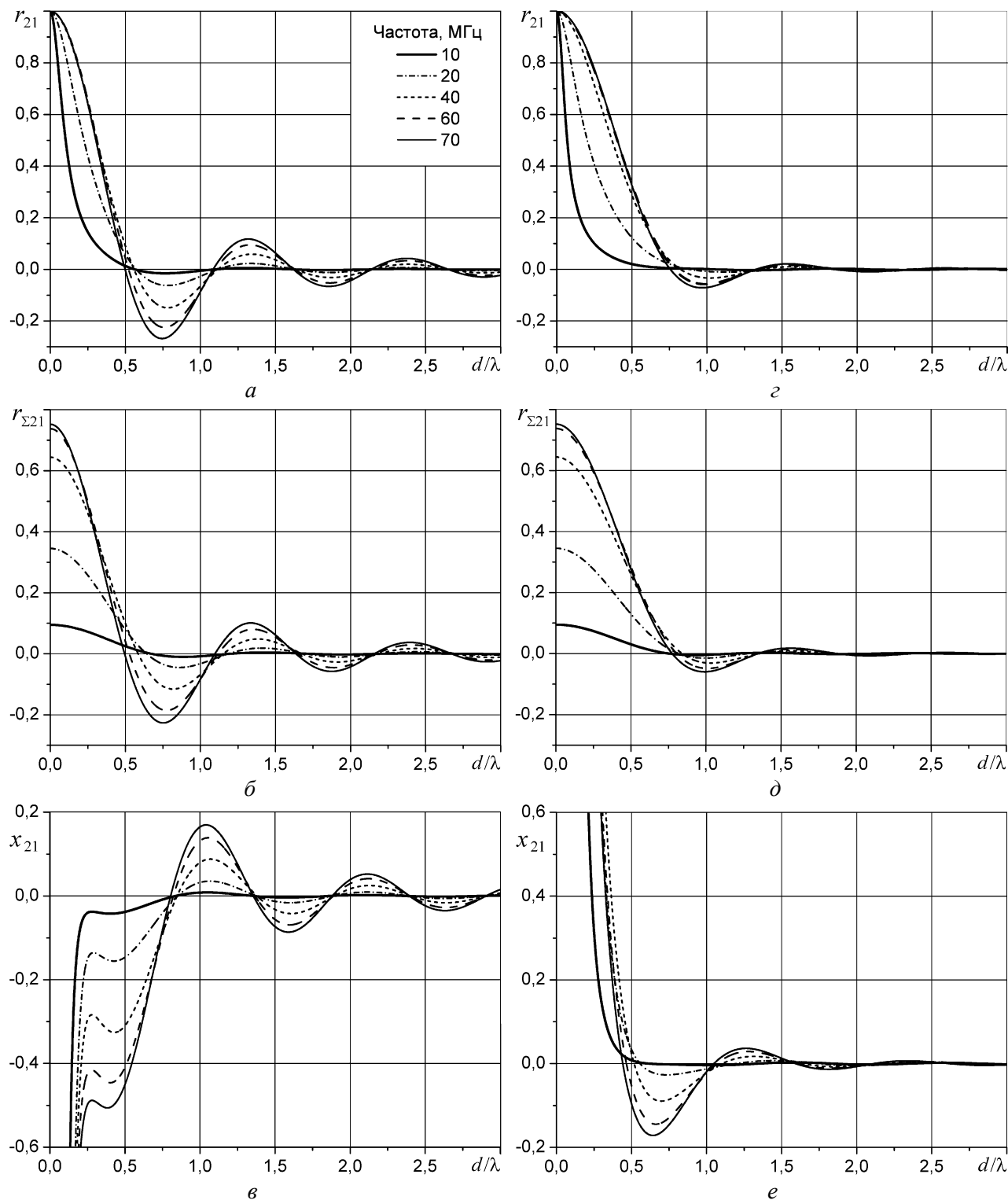


Рис. 3

Представленные здесь графики рассчитаны для двух вариантов ориентации (рис.1, *в*) диполей Герца: на рис.3, *а, б, в* – для параллельных диполей ($\alpha = 90^\circ$) и на рис.3, *г, д, е* – для коллинеарных ($\alpha = 0$). Высота подвеса диполей Герца была выбрана равной $h = 1,33$ м, что

примерно совпадает с расположением фазового центра исследуемого плоского вибратора, а параметры земли, были приняты равными: $\epsilon_r = 10$ – относительная диэлектрическая проницаемость и $\sigma = 0,025$ С/м – удельная электрическая проводимость, что соответствует средним их значениям в месте строительства радиотелескопа ГУРТ. Расчет выполнялся по методике, изложенной в работе [17], которая сводится к численному интегрированию интегралов Зоммерфельда, из которых предварительно выделяются сингулярные части.

Кривые $z_{21}(d)$ на рис.3 легко объяснимы, поскольку отражают известные зависимости горизонтальных составляющих напряженности электрического поля диполя Герца (поперечной для параллельной ориентации и продольной для коллинеарной) над частично поводящим полупространством от расстояния и частоты. Чем ниже частота, тем меньше электрическая высота подвеса диполя и тем быстрее убывает его поле с расстоянием. Взаимные сопротивления между коллинеарными диполями Герца с расстоянием убывают намного быстрее, чем между параллельными, поскольку радиальная компонента напряженности электрического поля диполя уменьшается с расстоянием быстрее, чем поперечная. Особо следует остановиться на взаимных сопротивлениях излучения между диполями. По внешнему виду зависимости $r_{\Sigma 21}(d)$ похожи на кривые, отражающие аналогичную зависимость вещественной части полного взаимного сопротивления $r_{21}(d)$. Однако, если сопротивление $r_{21}(d)$ при $d \rightarrow 0$ стремится к единице (т.е. собственному сопротивлению), то $r_{\Sigma 21}(d)$ стремится к величине КПД диполя Герца. Потерянной мощностью в данном случае традиционно считается мощность, рассеянная в неидеальной земле [22].

Теперь проанализируем аналогичные зависимости, рассчитанные для исследуемых вибраторов и представленные в виде графиков: на рис.4, а – для параллельных и рис.4, б – для коллинеарных. Здесь, как на рис.3, вдоль осей ординат отложены значения нормированных сопротивлений $r_{21}, r_{\Sigma 21}$ и x_{21} , для перехода к которым от ненормированных сопротивлений $R_{21}, R_{\Sigma 21}$ и R_{21} с размерностью (Ом) использовалось следующее правило:

$$r_{21}(d) = R_{21}(d)/R_{11}(d); \quad x_{21}(d) = X_{21}(d)/R_{11}(d); \quad r_{\Sigma 21}(d) = R_{\Sigma 21}(d)/R_{11}(d),$$

Сравнивая эту серию графиков (рис.4) с рассмотренной выше серией для диполей Герца (рис.3), можно отметить целый ряд совпадений. Как и следовало ожидать, в обоих случаях наблюдаются общие тенденции изменения взаимного сопротивления с ростом частоты и увеличением дистанции между вибраторами, а также при смене их ориентации от параллельной к коллинеарной. Более того, кривые $r_{21}(d)$, $x_{21}(d)$ и $r_{\Sigma 21}(d)$, показывающие зависимости взаимных сопротивлений между плоскими вибраторами от расстояния d на частотах до 40 МГц, практически совпадают с аналогичными кривыми для диполей Герца, построенными здесь пунктирными линиями. Однако ближе к области параллельного резонанса (от 60 до 70 МГц) в характеристиках сравниваемых излучателей наблюдаются существенные различия, что объясняется заметным отличием исследуемых плоских вибраторов от минимально рассеивающих антенн. Причем эти различия не исчезают даже при их разnose на несколько длин волн. Кривые для этих частот не сравниваются здесь с аналогичными для диполей Герца ввиду их заметного различия, что легко увидеть, сравнив рис.3 и 4.

Глядя на графики, приведенные на рис.4, может создаться ложное впечатление, что в антенной решетке (рис.1, б), работающей в сверхшироком диапазоне частот 10 – 70 МГц, взаимные связи на низких частотах имеют намного меньший вес, чем на высоких, поскольку они более быстро убывают с увеличением дистанции между элементами. На самом деле, это не так, поскольку шаг решетки $d = 3,75$ м (рис.1, б) на частоте 70 МГц эквивалентен $0,875\lambda$, на 40 МГц он равен $0,5\lambda$, а на 10 МГц он составляет всего $0,125\lambda$. Для параллельной ориентации вибраторов активная часть нормированного взаимного сопротивления r_{21} при рас-

стоянии $d = 3,75$ м между ними на этих частотах принимает значения 0,029, 0,267 и 0,39 соответственно, из чего можно сделать вывод, что взаимные сопротивления в нижней части рабочего диапазона частот должны влиять на параметры решетки не в меньшей степени, чем в верхней его части. Это говорит о важности корректного расчета взаимных связей и их учета при анализе параметров и характеристик сверхширокополосной ФАР на всех участках ее рабочего диапазона.

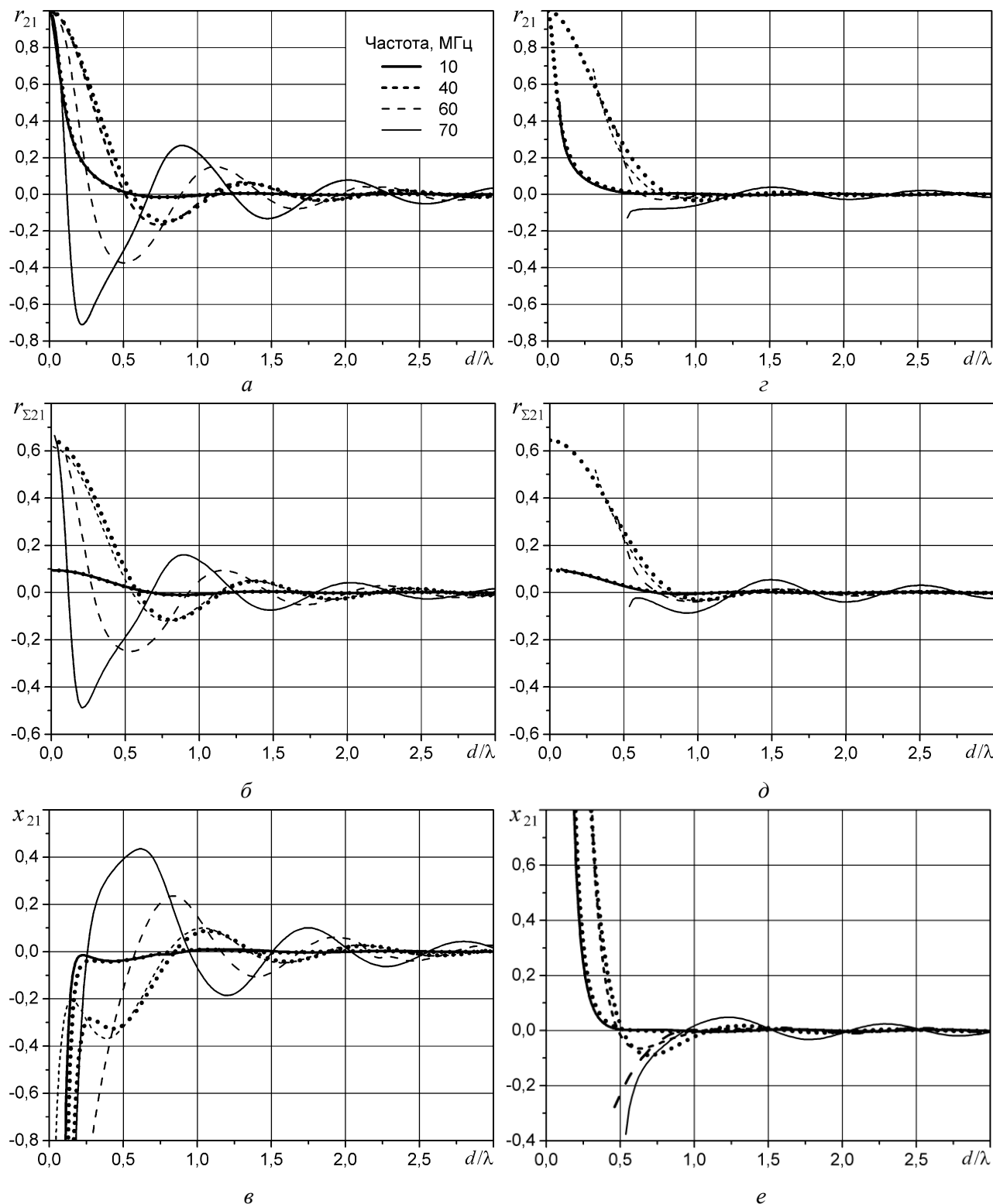


Рис. 4

Заклучение

Выполнен численный анализ взаимных сопротивлений между двумя проволочными вибраторами сложной конфигурации, расположенными над поверхностью земли, которые используются для построения сверхширокополосной ФАР нового низкочастотного радиотелескопа ГУРТ. Все расчеты проводились методом электродинамического моделирования с привлечением известной программы NEC2, в основе которой лежит метод моментов. Результаты вычислений представлены в графической форме в виде зависимостей нормированных взаимных сопротивлений между вибраторами от расстояния между ними для нескольких частот в диапазоне от 10 до 70 МГц. Показано, что в нижней части этого частотного диапазона поведение взаимных сопротивлений между исследуемыми вибраторами с изменением частоты и расстояния практически неотлично от поведения электрических диполей Герца. Результаты работы могут быть полезны для специалистов, занимающихся исследованием и проектированием широкополосных антенных решеток декаметрового диапазона волн.

Список литературы: 1. *Mailloux R.J.* Phased array antenna handbook. – Artech House, 2005. – 496 с. 2. *Hansen R.C.* Phased array antennas. 2nd ed. – Wiley, 2009. – 547 с. 3. *Коноваленко А.А.* Перспективы низкочастотной радиоастрономии // Радиопизика и радиоастрономия. – 2005. – Т.10. – С. 86–114. 4. *Falkovich I.S., Konvalenko A.A., Gridin A.A., Sodin L.G., Bubnov I.N., Kalinichenko N.N., Rashkovskii S.L., Mukha D.V., Tokarsky P.L.* Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy // Experimental astronomy. – 2011. – Vol. 32. – P. 127–145. 5. *Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., and Denis L.* A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // Astronomy & Astrophysics. – 2010. – Vol. 510. – P. 16–28. 6. *De Vos M., Gunst A.W., Nijboer R.* The LOFAR Telescope: System Architecture and Signal Processing // IEEE Proc. – 2009. – V.97. – P. 1431–1437. 7. *Ellingson S., Clarke T.E., Cohen A. et al.* The long wavelength array // Proc. IEEE. – 2009. – Vol. 97. – P. 1421–1430. 8. *Girard J.N., Zarka P., Tagger M. et al.* Antenna design and distribution for a LOFAR Super Station in Nançay // Proc. of JS'2011 URSI, Cnam Paris. – 2011. – P. 43–48. 9. *Konvalenko A.A., Falkovich I.S., Gridin A.A., Tokarsky P.L., Yerin S.N.* UWB active antenna array for low frequency radio astronomy // Proc. of the VI-th Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), Ukraine, Sevastopol, 201. – P. 39–43. 10. *Токарский П.Л.* Взаимные связи в системе излучателей с джоулевыми потерями // Радиотехника и электроника. – 1986. – Т.31. № 9. – С. 1717–1723. 11. *Вендик О.Г.* Антенны с немеханическим движением луча. – М.: Сов. радио, 1965. – 360 с. 12. *Сазонов Д.М.* Расчет взаимных импедансов произвольных антенн по их диаграммам направленности // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т.15, №2. – С. 376–378. 13. *Burke G.J., Poggio A.G.* Numerical Electromagnetic Code (NEC). Pt. II. Program Description – Code. Lawrence Livermore National Laboratory UCID-18834; USA, Ca., 1981. – 81 с. 14. <http://www.si-list.net/swindex.html> <http://www.qsl.net/4nec2/>. 15. *Wasyliwskyj W., Kahn W.K.* Theory of mutual coupling among minimum-scattering antennas // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. – 1970. – VI. AP-18. № 2. – P. 204–216. 16. *Токарский П.Л.* Взаимные сопротивления и КПД горизонтальных электрических диполей, расположенных над поверхностью земли // Радиотехника. – 2001. – Вып. 118. – С. 42–46.

Радиоастрономический институт НАН Украины

Поступила в редколлегию 05.03.2013