

УДК 621.396.677.494

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛОСКОГО СКАНЕРА БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КРУПНОАПЕРТУРНЫХ АНТЕНН

USE OF THE PLANAR NEAR-FIELD SCANNER FOR MEASUREMENTS OF LARGE APERTURE ANTENNAS

А. А. Калинин,

нач. сектора СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП», канд. техн. наук, доцент

А. В. Пархоменко,

вед. инженер-конструктор СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП»

Д. А. Солонович,

вед. инженер-конструктор СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП», магистр техн. наук

П. И. Крупский,

инженер-конструктор I категории СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП», магистр техн. наук

A. Kalinin, A. Parhomenko, D. Solonovich, P. Krupski

Дата поступления в редакцию — 02.09.2016 г.

В статье описана конструкция плоского сканера ближнего поля и приводятся результаты измерений антенной решетки больших волновых размеров. Показано, что целый ряд работ по юстировке и настройке антенных решеток можно проводить только с применением построенного сканера.

The article describes the design of planar near-field scanner and the results of measurements of the large wave sizes array. It is shown that a number of works on alignment and setup antenna arrays must be carried out only with the use of a scanner constructed.

Введение.

Антенные системы, используемые в радиолокации, радиосвязи, радионавигации, работают, как правило, в дальней зоне. В настоящее время для выполнения антенных измерений разработано достаточно много методов, которые можно разделить на две большие группы: измерения в дальней зоне и измерения в ближней зоне.

К методам дальней зоны обычно относят ставшие уже традиционными наземный полигонный и облетный, а также радиоастрономический и радиометрический методы, а к методам ближней зоны — голографический и коллиматорный [1], [2].

Методы дальней зоны имеют ряд существенных недостатков и ограничений, основными из которых являются отражения волн от земли и местных предметов, а также необходимость построения больших и дорогостоящих полигонов. Особенно сильно проблемы использования этих методов проявляются при измерении антенн больших волновых размеров.

В значительной мере свободными от указанных недостатков являются методы измерений параметров антенн в ближней зоне: коллиматорный и голографический.

Коллиматорный метод измерений предусматривает искусственное создание условий, в которых должна находиться антенна в дальней

зоне. Он основан на возможности формирования поля, близкого к полю плоской волны, при помощи вспомогательной антенны — коллиматора, расположенной в непосредственной близости от исследуемой антенны. Достоинствами метода являются сравнительная простота схемы и близкое совпадение методик антенных измерений с соответствующими методиками, применяемыми при работе в дальней зоне.

При голографическом методе характеристики антенн находят путем обработки результатов измерений ближнего поля — восстановление поля излучения антенн в дальней зоне по полю в ближней зоне. Особо необходимо отметить, что голографический метод зачастую оказывается единственно возможным методом определения характеристик и параметров крупноапертурных антенн. Голографический метод обеспечивает также решение ряда других важных задач антенной техники: настройки, диагностики и дефектоскопии систем ФАР, дефектоскопии антенных обтекателей, исследования профиля больших зеркальных антенн и т. д.

Измерения в ближней зоне голографическим методом обычно выполняются методами плоского, цилиндрического или сферического сканирования [3–6]. Выбор типа поверхности перемещения вспомогательной антенны-зонда относительно исследуемой антенны связан прежде всего с перечнем решаемых задач, а также с возможностью реализации конструкции позиционера и сложностью алгоритмов обработки результатов измерений. Например, плоский или планарный сканер удобно использовать при измерении антенн с большим коэффициентом усиления, с малым уровнем бокового излучения, при этом требуется меньшее количество точек измерений, а следовательно, сокращается время измерений. Таким образом, плоский сканер ближнего поля достаточно полно обеспечивает решение задачи измерения антенн больших волновых размеров. В статье на примере результатов измерений антенной решетки больших волновых размеров описываются основные возможности плоского сканера ближнего поля.

Плоский сканер ближнего поля.

На предприятии НПООО «ОКБ ТСП» разработан и введен в эксплуатацию лабораторный измерительный комплекс на базе плоского

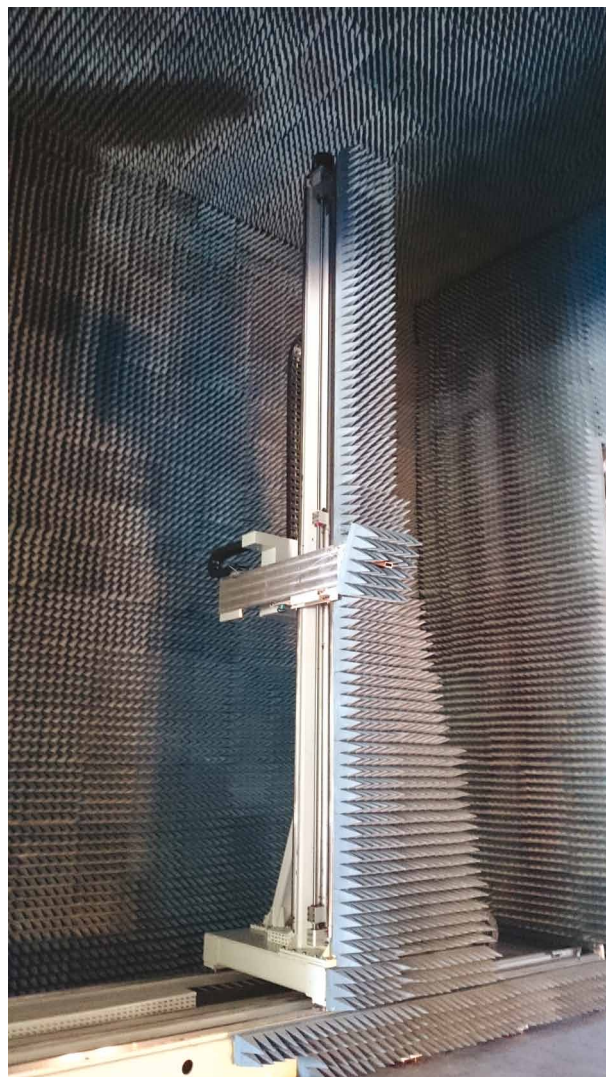


Рис. 1. Плоский сканер ближнего поля

сканера ближнего поля. Он размещен в экранированном ангаре с эффективностью экранирования не хуже 50 дБ, что соответствует II классу экранированных камер согласно ГОСТ Р 50414-92. Сканер размещается в полубезэховой камере, покрытой радиопоглощающим материалом типа ТОРА-25 с коэффициентом отражения не хуже –30 дБ в диапазоне частот от 1,5 ГГц и выше. Сканер построен на базе вертикального 3-координатного прецизионного позиционера с областью сканирования 8316×6180×1000 мм. Внешний вид сканера представлен на рис. 1. Погрешность позиционирования вспомогательной антенны-зонда по всем осям координат не хуже 0,1 мм, что обеспечивает приемлемую точность измерений на частотах вплоть до 18–20 ГГц.

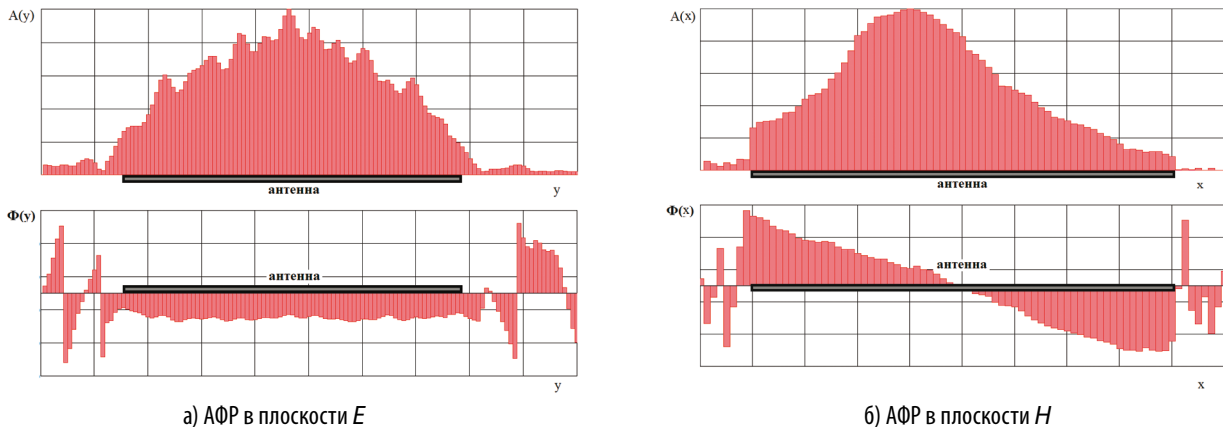


Рис. 2. АФР антенной решетки в главных плоскостях

Разработанное программное обеспечение позволяет:

1. управлять позиционером по заданной программе;
2. проводить необходимые измерения амплитуды и фазы поля ближней зоны в заданных точках пространства;
3. рассчитывать и визуализировать следующие характеристики и параметры исследуемых антенн:

- амплитудную диаграмму направленности (АДН);
- фазовую диаграмму;
- коэффициент направленного действия;
- коэффициент усиления;
- поляризационные параметры.

В комплект оборудования ЛИК входят также набор вспомогательных антенн-зондов различных диапазонов частот и векторный анализатор цепей Agilent E5170C.

Результаты измерений.

Объект исследований. В качестве измеряемой антенны выступала плоская антенная решетка S-диапазона с одномерным сканированием, состоящая из горизонтально расположенных линейных излучателей вертикальной поляризации. Волновые размеры антенны составляют: в горизонтальной плоскости — 30λ , в вертикальной — 10λ . Амплитудно-фазовое распределение на антенне разделяющееся. Амплитудное распределение в обеих плоскостях комбинированное, фазовое распределение в горизонтальной плоскости линейное, в вертикальной плоскости — постоянное.

Измерение амплитудно-фазового распределения поля. В процессе измерений антенна-

зонд перемещалась в плоскости, параллельной апертуре антенной решетки на удалении d от нее по строчно-столбцовой траектории с шагом Δx в горизонтальной плоскости и Δy — в горизонтальной.

Рекомендуемое удаление антенны-зонда от поверхности исследуемой антенны при измерении параметров поля ближней зоны лежит в пределах единиц длин волн $\lambda < d < 3\lambda$ [3, 5]. При уменьшении этого расстояния усиливается взаимное влияние измеряемой антенны и антенны-зонда, что ведет к искажениям измеряемых величин, при увеличении — значительно возрастают размеры необходимой области сканирования [4]. В процессе измерений задавалось удаление $d = \lambda$.

Требования к максимальному значению шага дискретизации по пространству, обеспечивающие приемлемую точность расчетов характеристик направленности антенн, записываются в виде $\Delta x \leq 0,5\lambda$ и $\Delta y \leq 0,5\lambda$. Для повышения наглядности отображения законов изменения амплитуды и фазы поля вблизи антенны, а также повышения точности последующей юстировки антенной решетки значения шага дискретизации были значительно занижены и составляли около $0,2 \lambda$.

На рис. 2 представлены законы амплитудного и фазового распределений (АФР) поля излучения антенной решетки в главных плоскостях. На графиках АФР отмечено положение антенны. Как видно, линейные размеры области сканирования превышают линейные размеры антенны в соответствующих плоскостях. Амплитуда поля на краях области сканирования более, чем на 30 дБ, меньше максимальных значений, что позволяет считать достоверными результаты расчета ДН в секторе углов до $50-60^\circ$ [4].

Закон амплитудного распределения в плоскости E имеет осцилляции на вершине, что может указывать на наличие наведенных в этой плоскости токов на соседних излучателях, а также на взаимное влияние антенны-зонда и измеряемой антенны. При увеличении удаления d плоскости сканирования от антенны осцилляции амплитуды уменьшаются, однако для сохранения диапазона углов расчета ДН необходимо увеличивать линейный размер области сканирования в вертикальной плоскости. В плоскости H осцилляции амплитуды не наблюдается, поскольку токи проводимости на излучателях не имеют горизонтальной составляющей. Кроме того, антенна-зонд имеет лучшие направленные свойства в плоскости H , а следовательно, обеспечивает меньшие размеры участка исследуемой антенны, подсвечивающего антенну-зонд. Соответственно, уменьшаются и интерференционные явления. Законы фазового распределения близки к расчетным.

За пределами антенны в плоскости E амплитуда поля спадает плавно, в плоскости H — достаточно резко, что объясняется вертикальной поляризацией излучаемого поля.

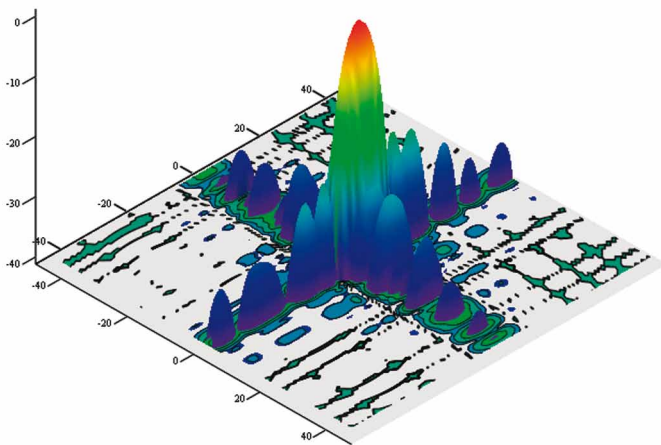
Расчет ДН. Как известно [1], распределение поля в дальней зоне антенны и амплитудно-фазовое распределение поля на апертуре антенны связаны преобразованием Фурье:

$$E(k_x, k_y) \approx S(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy,$$

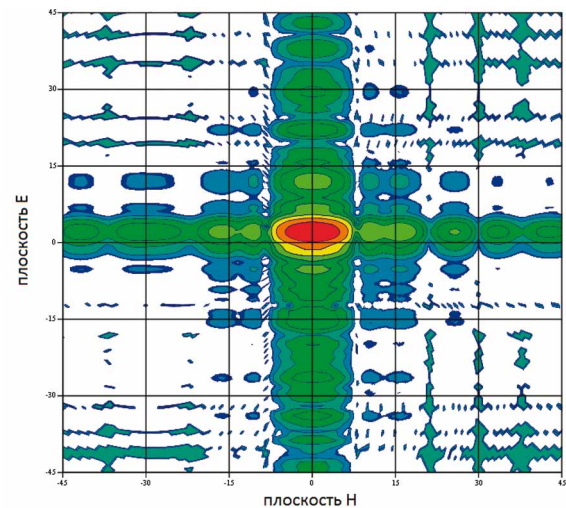
где $S(k_x, k_y)$ — спектр плоских волн;
 $k_x = k \sin\theta \cos\varphi$, $k_y = k \sin\theta \sin\varphi$, $k = 2\pi / \lambda$.

Имея по результатам измерений конечный набор отсчетов амплитуд и фаз поля в ближней зоне для расчета ДН антенны удобно использовать двойное быстрое преобразование Фурье.

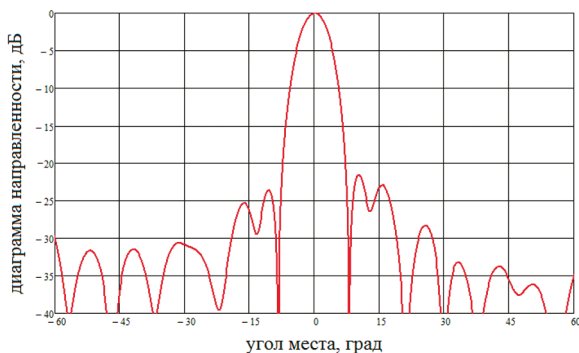
На рис. 3 представлены объемная ДН исследуемой антенны, ее картографическое изобра-



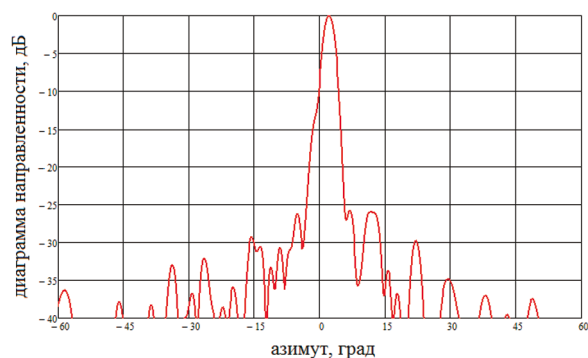
а) Объемная ДН



б) Картографическое изображение ДН



в) ДН в плоскости E



г) ДН в плоскости H

Рис. 3. ДН исследуемой антенны

жение линиями уровня, а также и два сечения ДН в главных плоскостях.

Разработанное программное обеспечение позволяет выводить графическое изображение ДН различными способами, в разных системах координат и масштабах. Возможность анализа трехмерных изображений обеспечивает наблюдение ДН не только в главных плоскостях антенны, но и в любом другом сечении. Представленные результаты позволяют сделать вывод, что для исследуемой антенной решетки плоское сканирование обеспечивает получение достоверных данных о направленных свойствах антенны в диапазоне углов не менее $\pm 60^\circ$ относительно плоскости сканирования.

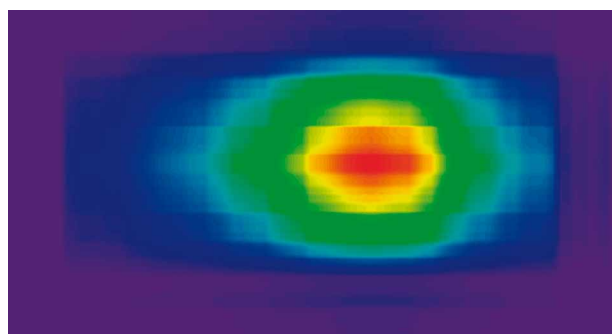
Дефектоскопия. При разработке различных типов сложных антенн на этапе макетирования зачастую возникает проблема выяснения причин неудовлетворительных характеристик разрабатываемого изделия, например искажения формы ДН, повышенного уровня боковых лепестков и т. д. Найти причины таких искажений по измеренной интегральной характеристике антенны в дальней зоне, то есть ее ДН, не всегда представляется возможным. Наиболее полную информацию о причинах неудовлетворительной работы антенны за счет возможности характеристики локальных особенностей в структуре излучаемого электромагнитного поля можно получить, проведя анализ АФР поля в ее раскрыве.

В качестве примера на рис. 4 представлено распределение амплитуд излучаемого поля на раскрыве исправной антенной решетки и при отказавшем канале номер 3. Отказ канала имитировался его возбуждением сигналом с нулевой амплитудой. Излучающий элемент при этом оставался нагруженным на согласованную нагрузку.

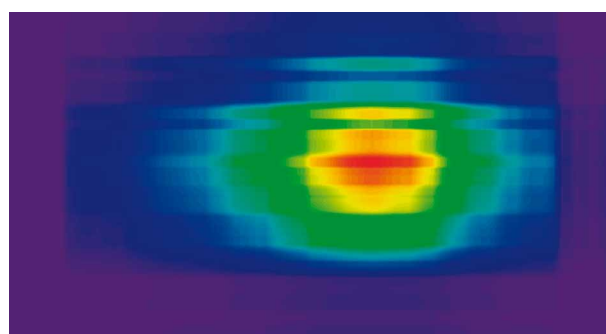
Юстировка каналов антенных решеток. Параметры антенных решеток, используемых в составе радиотехнических средств различного назначения, в значительной степени определяются разбросами коэффициентов усиления и фазовыми ошибками каналов. Поэтому в процессе настройки и приведения таких антенн в готовность к работе возникает проблема обеспечения идентичности приемо-передающих трактов совместно с излучающими элементами. Использование плоского сканера позволяет достаточно несложно осуществить решение данной задачи.

В качестве примера на рис. 5 приведены законы распределения амплитуд и фаз излучаемого решеткой поля при работе только первого и только среднего из N излучателей. Все неактивные в момент измерения излучатели подключены к согласованным нагрузкам. По аналогии с ДН такие распределения можно назвать частными или парциальными АФР элементов решетки. На графиках фазового распределения отчетливо видны и отмечены точки перегиба, положение которых соответствует местам установки активных излучателей. Антенна-зонд сканера перемещается по плоскости, параллельной апертуре исследуемой антенны. Поэтому значения амплитуды и фазы поля для точек размещения излучателей, полученные поочередно для всех элементов решетки, характеризуют неидентичности каналов антенной решетки. Именно они и должны учитываться и устраняться при управлении антенной решеткой.

Наличие парциальных АФР каждого элемента может оказаться весьма полезным при разработке антенных решеток с управлением амплитудой и фазой колебаний в каналах. При



а) все каналы исправны



б) отказавший канал номер 3

Рис. 4. АФР на раскрыве антенной решетки

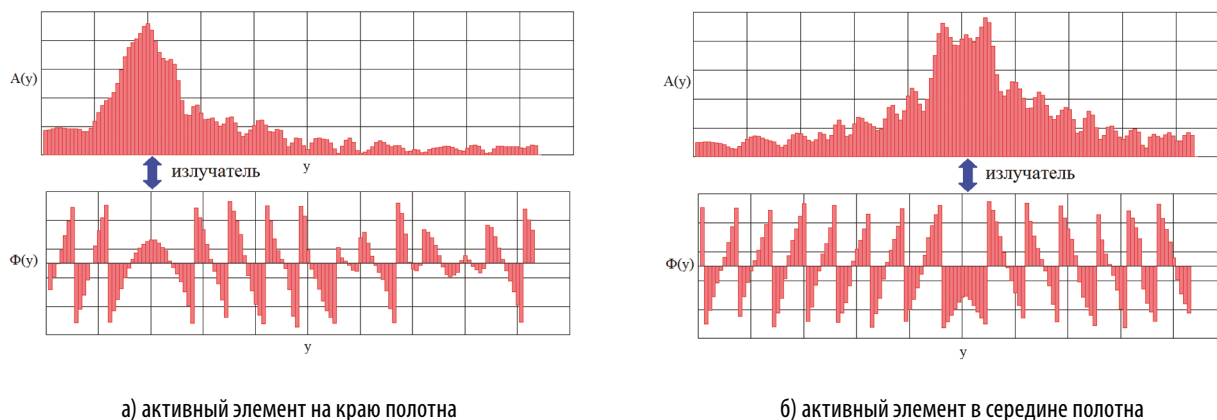


Рис. 5. Законы амплитудного и фазового распределения поля на раскрыве антенной решетки при возбуждении только одного элемента

классическом цифровом формировании ДН антенной решетки необходимо проводить взвешенное суммирование сигналов всех каналов [7]. Используемые при этом весовые коэффициенты задаются требуемым АФР решетки и определяют параметры формируемой ДН. На этапе проектирования антенной решетки при выборе необходимых законов амплитудного и фазового распределений решетки можно проводить аналогичные описанным выше действия с парциальными АФР ее элементов. В этом случае можно не проводя дополнительных измерений получать информацию о направленных свойствах антенны.

Заключение.

Плоский сканер ближнего поля выполняет измерение тонкой структуры поля ближней зоны антенн больших и средних волновых размеров. Расчет объемных ДН антенн с высокой точностью обеспечивается в диапазоне углов $\pm 60^\circ$ относительно нормали к плоскости сканирования.

Построенный сканер открывает новые возможности для юстировки, настройки и дефектоскопии, оптимизации возбуждения антенных решеток, что позволяет значительно сократить временные и материальные затраты на их разработку и приведение в готовность к работе.

Литература:

1. Бахрах, Л. Д. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий, А. П. Курочкин и др. — Л.: Наука, 1985. — 272 с.
2. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев, А. А. Леманский, В. И. Турчин и др.; под ред. Н. М. Цейтлина. — М.: Радио и связь, 1985. — 368 с.
3. Near-field vs Far-field [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://keysight.com/upload/cms_upload/All/NSI-near-far.pdf, свободный (дата обращения: 02.08.2016).
4. Antenna Measurement Theory. Introduction to Antenna Measurement [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://keysight.com/upload/cms_upload/All/ORFR-Theory.pdf, свободный (дата обращения: 02.08.2016).
5. Near Field Antenna Measurement Theory, Planar, Cylindrical and Spherical [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://nearfield.com/aboutus/documents/Nearfield_Antenna_Test_Theory.pdf, свободный (дата обращения: 02.08.2016).
6. S. Pivnenko. Antenna Measurements: Fundamentals and Advanced Techniques // 24th International Travelling Summer School on Microwaves and Lightwaves. — 2014. — Copenhagen, Denmark.
7. Григорьев, Л. Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в цифровых антенных решетках / Л. Н. Григорьев. — М.: Радиотехника, 2010. — 144 с.