

Экспериментальные исследования зеркальной антенны с облучателем обратного излучения трехсантиметрового диапазона во временной области с преобразованием в частотную область

© В.Г. Жирнов¹, И.И. Лебедюк²

¹Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Дмитров,
Московская область, 141801, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведены результаты измерений диаграмм направленности и коэффициентов усиления зеркальной антенны с облучателем обратного излучения трехсантиметрового диапазона, полученные во временной области в условиях бокса ограниченных размеров и безэховости при оптимальной фокусировке в зону расположения датчика поля с последующим преобразованием результатов измерений в частотную область. Предложена методика настройки оптимального расположения облучателя обратного излучения для фокусировки зеркальной антенны на бесконечность.

Ключевые слова: диаграмма направленности, коэффициент усиления, дальняя зона.

Введение. Исследование характеристик антенн миллиметрового и сантиметрового диапазонов сопряжено с известными трудностями, связанными с большими расстояниями до дальней зоны, минимальные значения которых выбирают из соотношения [1]

$$Z_{\min} \geq \frac{2d^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где d — диаметр антенны; λ — длина волны.

При таком выборе расстояния ошибки в измерении коэффициента усиления не превышают 5 %. Так, для зеркальной антенны трехсантиметрового диапазона диаметром 1 м $Z_{\min} = 67$ м, а на расстоянии 10 м ошибка в измерении коэффициента усиления составит 50 %.

В данной работе ставится задача экспериментального исследования возможностей измерения характеристик больших антенн во временной области с преобразованием в частотную область в условиях бокса ограниченных размеров (6×6×12 м) и безэховости при тождественности углового распределения антенны на бесконечности и ее фокусировке в ближнюю зону [2—4]. С этой целью на опорноповоротном устройстве (ОПУ) установки для измерения параметров антенн во временной области [5] смонтирована зеркальная параболическая антенна.

ческая антенна (рис. 1) диаметром $d = 1$ м и параметром $F/6d = 0,44$, где F — фокусное расстояние параболоида с облучателем обратного излучения трехсантиметрового диапазона [5, 6]. Облучатель обратного излучения формирует почти сферическую волну, центр излучения которой должен совмещаться с фокусом параболического зеркала, находящемся на расстоянии 0,44 м от вершины параболоида, образующего поверхность зеркала. При этом в раскрыве параболического зеркала формируется почти равномерное и синфазное распределение поля. Питание облучателя обратного излучения осуществляется через круглый волновод, а последнего — через переход от прямоугольного волновода сечением 23×10 мм. Облучатель может перемещаться вдоль оси симметрии параболического зеркала с целью коррекции фазового распределения поля в раскрыве антенны от выпуклого до вогнутого с радиусами кривизны $\pm R$. При $R = \infty$ распределение поля синфазное. Расстояние между исследуемой и измерительной антеннами равно 6 м. Именно на это расстояние в процессе эксперимента должна быть сфокусирована исследуемая антенна, а критерием правильной фокусировки является максимальное значение коэффициента усиления исследуемой антенны. Очевидно, что для обеспечения фокусировки исследуемой антенны в ближнюю зону облучатель

должен смещаться в сторону увеличения расстояния от вершины зеркала относительно положения его фокуса. Фокусировку исследуемой антенны можно представить действием идеальной линзы, для которой выполняется следующее преобразование фазового распределения поля в раскрыве исследуемой антенны:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{F}, \quad (2)$$

где R — расстояние от исследуемой антенны до измерительной; $R_1 = F + \Delta$ — радиус кривизны фазового фронта облучателя; Δ — смещение облучателя из фокуса; F — фокусное расстояние параболического зеркала;



Рис. 1. Размещение на ОПУ зеркальной параболической антенны с облучателем обратного излучения трехсантиметрового диапазона

При $\Delta = 0$ $R = \infty$, что свидетельствует о синфазном распределении поля в раскрыве антенны.

Подставляя в (2) значение $R_1 = F + \Delta$, получаем выражение

$$R = -\frac{F(F + \Delta)}{\Delta}, \quad (3)$$

из которого следует, что при $\Delta > 0$ и $F > 0$ $R < 0$ (вогнутый фазовый фронт, соответствующий фокусировке на расстояние, равное R).

В качестве датчика поля использован пирамидальный рупор с раскрывом 80×80 мм и малым углом раскрыва, к которому через широкополосный коаксиально-волноводный переход с сечением волновода 23×10 мм подключены формирователь и генератор пикосекундных импульсов. Длительность зондирующего сигнала составляла 42 пс при амплитуде импульса 9 В.

Образцовой антенной, замещающей исследуемую антенну при измерении коэффициента усиления, служила антенна Пб-23М, установленная на треноге рядом с исследуемой зеркальной антенной на ОПУ (см. рис. 1).

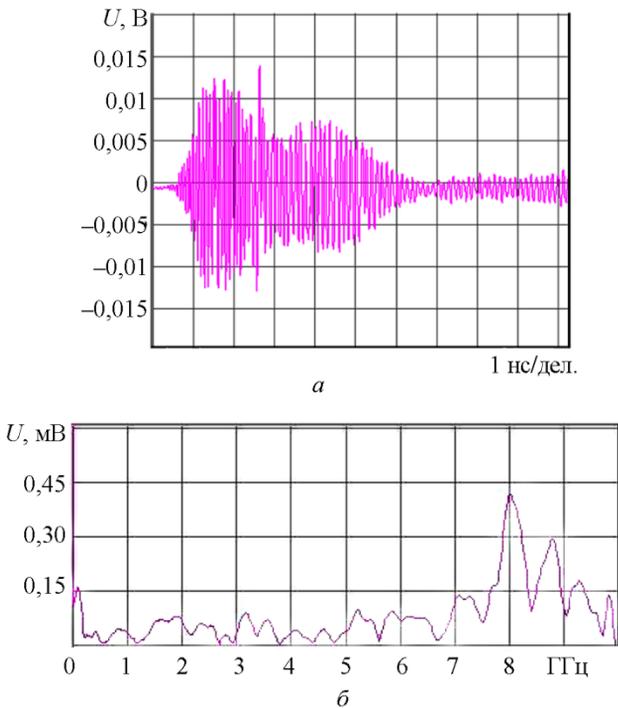


Рис. 2. Преобразование временного отклика зеркальной антенны с облучателем обратного излучения из временной области в частотную

Преобразование временного отклика зеркальной антенны с облучателем обратного излучения из временной в частотную область представлено на рис. 2. При этом в соответствии со спектром отклика длительность «окна» регистрации устанавливалась равной 10 нс (рис. 2, а), что позволило получить разрешение 3 м и избежать влияния отражений от стен бокса размером 6×6×12 м, внутри которого проводились измерения.

Как видно из рис. 2, спектр сигнала отклика исследуемой антенны на зондирующий сигнал лежит в диапазоне частот 7...10 ГГц, а его максимум приходится на частоту $f = 8$ ГГц. Изменяя положение облучателя зеркальной антенны в пределах от $F - 4$ см до $F + 15$ см и измеряя ее коэффициент усиления G в том же диапазоне частот замещением исследуемой антенны образцовой антенной П6-23М, получим максимальное значение коэффициента усиления $G_{\max} = 37,1$ дБ, которое также соответствует частоте 8 ГГц и положению облучателя $F + 5$ см. В таблице приведены результаты измерений на частоте 8 ГГц коэффициентов усиления и параметров диаграмм направленности (ДН) параболической зеркальной антенны диаметром $d = 1$ м, с фокусным расстоянием $F = 0,44$ м и облучателем обратного излучения, где Θ_0 — ширина ДН на уровне 3 дБ; $\Theta_{i1} - \Theta_{i2}$ — углы между i -ми боковыми лепестками; УБЛ $_{i-1,2}$ — уровни i -х боковых лепестков, Δ — смещение облучателя из фокуса антенны в направлении ее оси симметрии.

Как следует из таблицы, ширина ДН антенны $\Theta_0 = 2,2^\circ$ также соответствует положению облучателя $F + 5$ см. Отметим, что максимально возможный коэффициент усиления и минимальная ширина ДН для синфазной и равноамплитудной зеркальной антенны диаметром 1 м составляют соответственно 38,5 дБ и $2,1^\circ$ [5].

ДН исследуемой зеркальной антенны, измеренная при ее фокусировке в ближнюю зону на расстояние $R = 6$ м, приведена на рис. 3. Максимальный коэффициент усиления, минимальная ширина ДН и приближение их значений к предельно допустимым свидетельствуют о том, что при положении облучателя $F + 5$ см происходит фокусировка исследуемой антенны на расстояние 6 м в область расположения антенны, являющейся датчиком поля в схеме измерения коэффициента усиления и ДН, а результаты измерений тождественны измерениям в дальней зоне [1].

Запишем (3) относительно Δ , тогда

$$\Delta' = -\frac{F^2}{R + F}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) значения $R = -6$ м и $F = 0,44$ м, получаем необходимое для фокусировки исследуемой антенны в ближнюю зону смещение облучателя из фокуса $\Delta' = 0,035$ м.

Результаты исследования коэффициентов усиления G и параметров ДН параболической зеркальной антенны диаметром 1 м с фокусным расстоянием $F = 0,44$ м и облучателем обратного излучения на частоте $f = 8$ ГГц

$F+\Delta$, см	Θ_0 , град	G , дБ	$\Theta_{11}-\Theta_{12}$, град	$\frac{УБЛ_{1-1}}{УБЛ_{1-2}}$, дБ	$\Theta_{21}-\Theta_{22}$, град	$\frac{УБЛ_{2-1}}{УБЛ_{2-2}}$, дБ	$\Theta_{31}-\Theta_{32}$, град	$\frac{УБЛ_{3-1}}{УБЛ_{3-2}}$, дБ	$F+\Delta'$, см
$F-4$	5,526	—	—	—	20,395	$\frac{15}{15}$	30	$\frac{26}{26}$	$F-5,5$
$F-2$	4,737	—	—	—	17,632	$\frac{14,5}{14,5}$	30	$\frac{27}{26}$	$F-3,5$
$F-1$	4,079	33,11	—	—	17,895	$\frac{19,5}{20}$	30	$\frac{28,5}{28,5}$	$F-2,5$
$F\pm 0$	3,289	33,98	9,21	$\frac{21}{19,5}$	16,316	$\frac{15,5}{15,5}$	25	$\frac{22,5}{22,5}$	$F-1,5$
$F+1$	2,895	34,57	9,737	$\frac{21,5}{21}$	16,184	$\frac{20,5}{20,5}$	26,32	$\frac{24,5}{24,5}$	$F-0,5$
$F+2$	2,632	35,17	9,21	$\frac{25,5}{24}$	14,6	$\frac{17,5}{17,5}$	22,763	$\frac{25,5}{25,5}$	$F+0,5$
$F+3$	2,6	36,40	8,947	$\frac{20}{19,5}$	13,947	$\frac{22}{22,5}$	26,32	$\frac{30,5}{29,5}$	$F+1,5$
$F+4$	2,5	36,78	7,895	$\frac{24,5}{24,5}$	13,684	$\frac{16}{16}$	21,316	$\frac{22}{22}$	$F+2,5$
$F+5$	2,2	37,10	—	—	13,16	$\frac{18}{19}$	21	$\frac{25,5}{25}$	$F+3,5$
$F+6$	2,5	36,45	—	—	12,63	$\frac{17,5}{17,5}$	18,68	$\frac{22,5}{22,5}$	$F+4,5$
$F+10$	6,71	33,20	10,5	$\frac{8}{9,5}$	—	—	30	$\frac{22,5}{24}$	$F+8,5$
$F+15$	6,97	30,40	13,55	$\frac{5}{6,25}$	—	—	26,31	$\frac{16}{15,5}$	$F+13,5$

Следует, что реальное положение фазового центра облучателя обратного излучения неизвестно, поэтому в процессе исследований ставилась задача обоснования методики настройки положения облучателя зеркальной антенны для фокусировки на бесконечность, соответствующей синфазному распределению поля в раскрыве антенны,

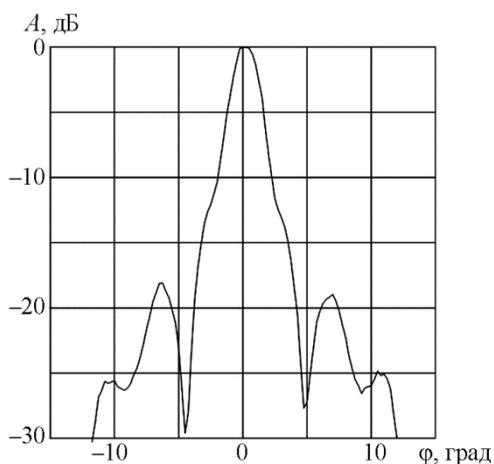


Рис. 3. ДН зеркальной антенны с синфазным распределением поля в раскрыве, измеренная при ее фокусировке в ближнюю зону на расстояние 6 м

ближней зоне на расстоянии R от раскрыва исследуемой антенны; в положении облучателя, при котором коэффициент усиления имеет максимальное значение, его значение, а также формы измеренной ДН (угловое распределение поля антенны) тождественны измерениям в дальней зоне; по формуле (4) рассчитывают значение Δ' , на которое надо изменить положение отсчетной плоскости облучателя для того, чтобы антенна стала синфазной ($\Delta' = 3,5$ см для антенны с фокусным расстоянием $F = 44$ см, фокусируемой при измерениях на расстоянии $R = 600$ см). В таблице приведены скорректированные значения $F + \Delta'$, из которых следует, что точная настройка положения облучателя, соответствующая синфазности поля в раскрыве антенны, находится между значениями $F + 1$ и $F + 2$ см. При этом в ближней зоне на расстоянии 6 м от исследуемой антенны ошибка измерения коэффициента усиления по сравнению с измерениями в дальней зоне и тождественными им измерениями при фокусировке в ближнюю зону составит $-2,53$ дБ, что хорошо согласуется с известными представлениями [1].

Рассмотрим экспериментальное исследование тождественности измерений при фокусировке в ближнюю зону и на бесконечность (дальняя зона) антенны с несинфазным полем, фаза которого изменяется по квадратичному закону и характеризуется значением максимального отклонения Ψ в центре и по краям апертуры.

На рис. 4 приведена ДН исследуемой зеркальной антенны с облучателем обратного излучения, смещенным на величину

$$\Delta' = \Delta'_1 + \Delta'_2. \quad (5)$$

по результатам измерения коэффициента усиления этой антенны, сфокусированной в ближнюю зону.

Таким образом, методика настройки положения облучателя обратного излучения заключается в следующем: перемещают облучатель параболической антенны вблизи его фокуса вдоль оси симметрии образующего параболоида и измеряют положение отражателя (см. таблицу, града « $F + \Delta$ »); в каждом положении отражателя измеряют коэффициент усиления и угловое распределение поля антенны в

Здесь одно из слагаемых, например Δ'_1 , отвечает за исходное сферическое распределение фазы поля в раскрыве антенны, а другое — $\Delta'_2 = 0,035$ — за фокусировку в ближнюю зону (находящуюся по-прежнему на расстоянии 6 м) и рассчитывается по формуле (4). Тогда $\Delta'_1 = \Delta' - \Delta'_2 = 0,05$ м, что в соответствии с (3) дает значение исходного радиуса кривизны фазового распределения поля в раскрыве антенны $R_2 = -4,312$ м.

Максимальное отклонение фазы по апертуре антенны рассчитывается по формуле

$$\Psi_{\max} = \pi \frac{d^2}{4\lambda R_2}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) значения входящих в него величин — диаметра зеркала $d = 1$ м; длины волны $\lambda = 3,75 \cdot 10^{-2}$ м; исходного радиуса кривизны фазового распределения $R_2 = -4,312$ м, — получаем исходное значение $\Psi_{\max} = 1,546 \pi$ рад. Сравнивая измеренную при фокусировке в ближнюю зону на расстояние 6 м ДН, приведенную на рис. 4, с ДН апертуры с равноамплитудным полем, фаза которого изменяется по квадратичному закону с максимальным отклонением фазы по апертуре $\Psi_{\max} = 1,5 \pi$, приведенной в работе [5], следует отметить хорошее совпадение их форм и параметров: ширина ДН по уровню 3 дБ равна соответственно 6,71 и 7,29°, а «провалы» в ДН при нулевых углах одинаковы и равны 3дБ.

Таким же образом можно проанализировать все остальные варианты измерений ДН в ближней зоне. Опуская подробности, можно также констатировать хорошее совпадение форм и параметров ДН, измеренных при фокусировке и в дальней зоне, по остальным вариантам измерений (см. таблицу).

Заключение. Получено экспериментальное подтверждение тождественности измерений характеристик антенн при фокусировке в ближнюю и дальнюю зоны для антенн с произвольным амплитудным и сферическим (квадратичным) фазовым рас-

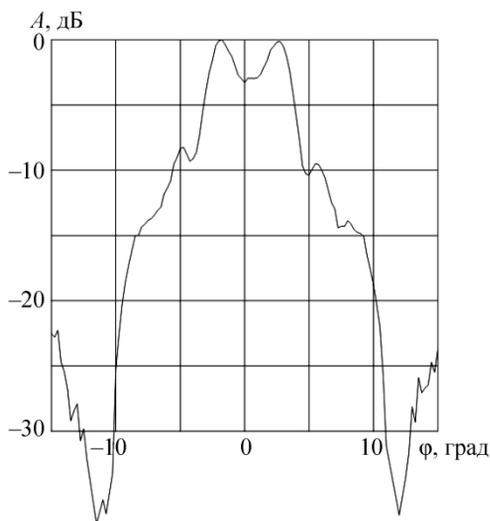


Рис. 4. ДН зеркальной антенны с квадратичным распределением поля в раскрыве ($\Psi_{\max} = 1,546 \pi$), измеренная при ее фокусировке в ближнюю зону на расстояние 6 м

пределением поля, теоретическое доказательство которой приведено в работе [4].

Экспериментально подтверждена возможность измерения во временной области с преобразованием в частотную область в условиях бокса ограниченных размеров и безэховости характеристик больших зеркальных антенн сантиметрового диапазона при тождественности углового распределения поля на бесконечности и фокусировке в ближнюю зону.

В процессе экспериментальных исследований получена методика настройки положения облучателя зеркальной антенны по результатам измерений в ближней зоне, обеспечивающая ее синфазность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фрадин А.З., Рыжков Е.В. *Измерение параметров антенн*. Москва, Связьиздат, 1962, 323 с.
- [2] Лебедюк И.И. Исследование тождественности углового распределения энергии антенны на бесконечности и в фокусе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*, 2009, спец. выпуск «Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия», с. 245—250.
- [3] *Антенна измерительная Пб-23М*: Руководство по эксплуатации — УШЯИ 464 653.003 РЭ ОАО «МНИПИ», 27 с.
- [4] Бей Н.А., Митрохин В.Н. Антенны обратного излучения на основе конических диэлектрических структур. *Антенны*, сб. статей под ред. А.А. Пистолькорса, выпуск 26, 1978, с. 146—155.
- [5] Бей Н.А., Митрохин В.Н. Исследование многомодовых антенн обратного излучения. *Антенны*, сб. статей под ред. Г.П. Слукина, 2005, № 10 (1001), с. 42—47.
- [6] Драбкин А.Л., Зуенко В.Л. *Антенно-фидерные устройства*. Москва, Советское Радио, 1961, 816 с.

Статья поступила в редакцию 26.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Жирнов В.Г., Лебедюк И.И. Экспериментальные исследования зеркальной антенны с облучателем обратного излучения трехсантиметрового диапазона во временной области с преобразованием в частотную область. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/950.html>

Жирнов Владимир Георгиевич родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Радиоинженер, сотрудник Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор восьми научных публикаций в области радиоэлектроники СВЧ. e-mail: zhirnovv@mail.ru

Лебедюк Игорь Иосифович родился в 1943 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 72 научных публикаций и изобретений в области антенн и техники СВЧ.