

УДК 621.396.671

ВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ С СОГЛАСУЮЩИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Н.Н. Горобец, А.Н. Горобец, Е.С. Махов

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4; Харьков, 61022, Украина.
e-mail: Nikolay.N.Gorobets@karazin.ua*

Поступила в редакцию 17 октября 2017 г.

Теоретически компьютерным моделированием и экспериментально исследованы возможности перестройки резонансной частоты и полосы рабочих частот по минимуму КСВН симметричных вибраторных антенн конечной длины, расположенных параллельно идеально проводящему плоскому экрану, путем размещения в ближней зоне вибратора между ним и экраном металлического штыря и/или диска. Показано, что наиболее широкополосный вариант антенны реализуется при размещении короткого штыря вблизи вибратора и диска вблизи экрана одновременно. Теоретически и экспериментально доказано, что используемые согласующие элементы практически не влияют на диаграммы направленности вибраторных антенн исследованного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитные волны, вибраторные антенны, согласование, диаграмма направленности

Теоретично комп'ютерним моделюванням і експериментально досліджені можливості перебудови резонансної частоти і смуги робочих частот по мінімуму КСВН симетричних вібраторних антен кінцевої довжини, розташованих паралельно плоскому екрану, що ідеально проводить, шляхом розміщення в ближній зоні вібратора між ним і екраном металевго штиря і/або диска. Показано, що найбільш широкопосмуговий варіант антени реалізується при розміщенні короткого штиря поблизу вібратора і диска поблизу екрану одночасно. Теоретично і експериментально доведено, що використані узгоджуючі елементи практично не впливають на діаграми спрямованості вібраторних антен дослідженого типу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електромагнітні хвилі, вібраторні антени, узгодження, діаграма спрямованості

It have been researched theoretically and by computer simulation the possibility of tuning a resonant frequency and band with minimal VSWR of symmetric dipole antennas of finite length placed parallel to the ideally conducting flat screen. It is reached by placing in the near zone between dipole and screen of metal pin and/or disk. Experimental study has been made as well. It is shown that the most broadband case is implemented by placing both elements – a short pin near to the dipole and disk close to the screen. Theoretically and experimentally proved that the used matching elements practically do not affect to the directivity pattern of given dipole antennas.

KEY WORDS: electromagnetic waves, dipole antenna, impedance matching, directivity pattern

ВВЕДЕНИЕ

Задача создания вибраторных антенн конечной длины с высоким коэффициентом полезного действия в широкой полосе частот актуальна для многих приложений на практике. Ее решение связано прежде всего с обеспечением согласования вибраторного излучателя с коаксиальным фидерным трактом в заданной рабочей полосе частот. Это достигается использованием трансформаторов полных сопротивлений, которые применительно к вибраторным излучателям обычно называют согласующими устройствами. Техника согласующих трансформаторов достаточно хорошо отработана в случае резонансных близких к полуволновым вибраторных излучателей, в которых реактивная составляющая входного сопротивления равна или близка к нулю. В случае необходимости работы антенны в широкой полосе частот, когда необходимо согласующим устройством компенсировать реактивную составляющую входного сопротивления вибратора, создание согласующего устройства весьма проблематично.

Цель настоящей статьи – экспериментально исследовать возможности перестройки резонансной частоты и согласования вибраторной антенны конечной длины, расположенной параллельно идеально проводящему плоскому экрану, с коаксиальным фидерным трактом путем размещения в области между вибратором и экраном неоднородности в виде штыря и/или диска малых электрических размеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теоретическое решение поставленной задачи встречает серьезные трудности по ряду причин:

1. Неоднородность вводится очень близко к вибратору заведомо в его ближней зоне и также очень близко (малые доли длины волны) к области возбуждения вибратора, в которой волновые

процессы изучены недостаточно полно.

2. Характерные размеры антенны сравнимы с длиной волны, поэтому простые приближенные методики, основанные на методах и идеях геометрической оптики, принципиально неприменимы.
3. Характерные размеры антенны и диапазон длин волн довольно широк, т.е. задача относится к многопараметрическим, поэтому ее решение с помощью разработанных к настоящему времени компьютерных программ, основанных на методах вычислительной математики, довольно затруднительно.

Отметим, что принципиальная возможность решения поставленной задачи предлагаемым способом – размещением согласующих неоднородностей между вибратором и экраном – не очевидна. Действительно, для согласования волноведущих и излучающих систем с разными волновыми сопротивлениями необходимо выполнение условия полного согласования $Z_1 = Z_2^*$. В классических трансформаторах полных сопротивлений управление амплитудой и фазой отраженной волны, во-первых, независимо, а во-вторых – реализуется в широких пределах, достаточных для обеспечения требуемого значения КСВН антенно-фидерной системы. В рассматриваемом случае и амплитуда и фаза отраженной от согласующего устройства волны определяются размерами согласующей неоднородности и ее положением относительно вибратора. Другими словами – и амплитуда и фаза волны, отраженной от согласующей неоднородности, может измениться в очень ограниченных пределах.

Для экспериментальной проверки предлагаемого способа согласования вибраторной антенны с коаксиальным фидерным трактом было изготовлено четыре варианта вибраторных излучателей:

1. Классический вариант сантиметрового и дециметрового диапазонов – симметричный вибратор на жестком коаксиале с двумя продольными щелями во внешнем проводнике коаксиального волновода [1].
2. Аналогичный вариант с диэлектрической втулкой на жестком коаксиале.
3. Симметричная вибраторная антенна на двух жестких полых металлических стойках, в одной из которых проходит коаксиальный кабель, аналогичная самолетной антенне радиовысотомера [2].
4. Симметричная вибраторная антенна А.А. Пистолькорса, выполненная из трубки, изогнутой соответствующим образом, внутри которой проходит коаксиальный кабель. Этот вариант антенны аналогичен антенне радиовысотомера [2], установленной на одной стойке.

Вибраторы устанавливались на металлическом экране квадратной формы с размером стороны около 1,5 длины волны. При этом обеспечивался электрический контакт внешнего проводника коаксиального фидера с экраном.

Эксперименты проводились в безэховой камере. В качестве основного измерительного средства использовался панорамный измеритель КСВН и затухания. В режиме свипирования частоты генератора в область между вибратором и экраном вводились согласующие неоднородности в виде короткого металлического стержня, длина которого изменялась от $\lambda/8$ до $\lambda/4$, или кругового диска также разных диаметров. Положение неоднородности фиксировалось в каждом случае с помощью подложки из пенопласта, которая практически не влияла на измеряемые значения КСВН. Многократными изменениями размеров и положения согласующей неоднородности добивались минимального значения КСВН в максимальной полосе частот. Далее измерялась зависимость КСВН настроенной таким образом антенны от частоты. Для обеспечения максимально возможной высокой точности измерений сами измерения проводились «по точкам» в режиме ручной перестройки частоты. Положение настроенного элемента измерялось и все размеры антенны с соответствующей настройкой вводились в компьютерную программу в качестве исходных данных. Расчеты зависимости КСВН соответствующих настроенных антенн от частоты и их диаграмм направленности на дискретных частотах рассчитывались с помощью программы FEKO LITE[3].

Уже предварительные расчеты и эксперименты показали, что штыревая неоднородность позволяет настраивать вибраторную антенну на минимум КСВН на определенной частоте при ее размещении вблизи вибратора на расстояниях от 0,02 до 0,1 длины волны. Такой же эффект достигается при использовании диска диаметром около половины длины волны, располагаемого на расстояниях от 0,05 до 0,2 длины волны от экрана. Отметим, что настроенный диск не имеет электрического контакта с опорными стойками (антенны 3 и 4) и такой контакт обеспечивался (в антенне 4). Оказалось, что в обоих этих вариантах настройка антенны на минимум КСВН возможна, минимальные достижимые значения КСВН и резонансные частоты отличаются незначительно.

Как показали результаты измерений, самые плохие характеристики согласования всех четырех типов антенн в широком диапазоне частот имеет петлевой вибратор А.А. Пистолькорса (№4 из экспериментальных макетов). Поэтому рассмотрим более подробно возможности согласования и достижимые характеристики именно этого варианта антенны. На рис. 1а представлена зависимость

КСВН экспериментального макета антенны без настроечных элементов от частоты. Видно, что даже в минимуме этой зависимости на частоте около 3,1 ГГц расчетное значение КСВН = 3,2, а экспериментальное КСВН = 3,5. Такие высокие значения КСВН объясняются большим отличием входного сопротивления вибратора (около 300 Ом) и волнового сопротивления коаксиального кабеля (50 Ом). На рис. 1б приведена исследуемая зависимость КСВН диполя Пистолькорса, настроенного на минимум КСВН с помощью штыревого согласующего элемента, расположенного параллельно вибратору. В этом случае и расчетные и экспериментальные величины КСВН уменьшились до 1,1, а сами кривые указывают на широкополосный характер согласования модифицированной таким способом антенны. Из рис. 1в, на котором представлена исследуемая зависимость КСВН вибратора, настроенного с помощью диска, видно, что такой согласующий элемент обеспечивает лучшее согласование в высокочастотной области полосы рабочих частот антенны.

Подчеркнем, что приведенные результаты экспериментов показывают, что штыревые согласующие элементы позволяют улучшить согласование антенны в низкочастотной области, а дисковые – в высокочастотной области полосы рабочих частот антенны. Этот вывод открывает возможности увеличения широкополосности петлевых вибраторных антенн путем использования согласующих элементов обоих типов одновременно. На рис. 1г приведена соответствующая зависимость, которая подтверждает этот вывод. Таким образом, усложнение конструкции антенны согласующими элементами оправдано полученным результатом согласования антенны в 17,5 % полосе частот по уровню КСВН $\leq 1,5$ и 18,7 % по уровню КСВН $\leq 2,0$, тем более что в исходной антенне такие значения КСВН вообще не достигаются.

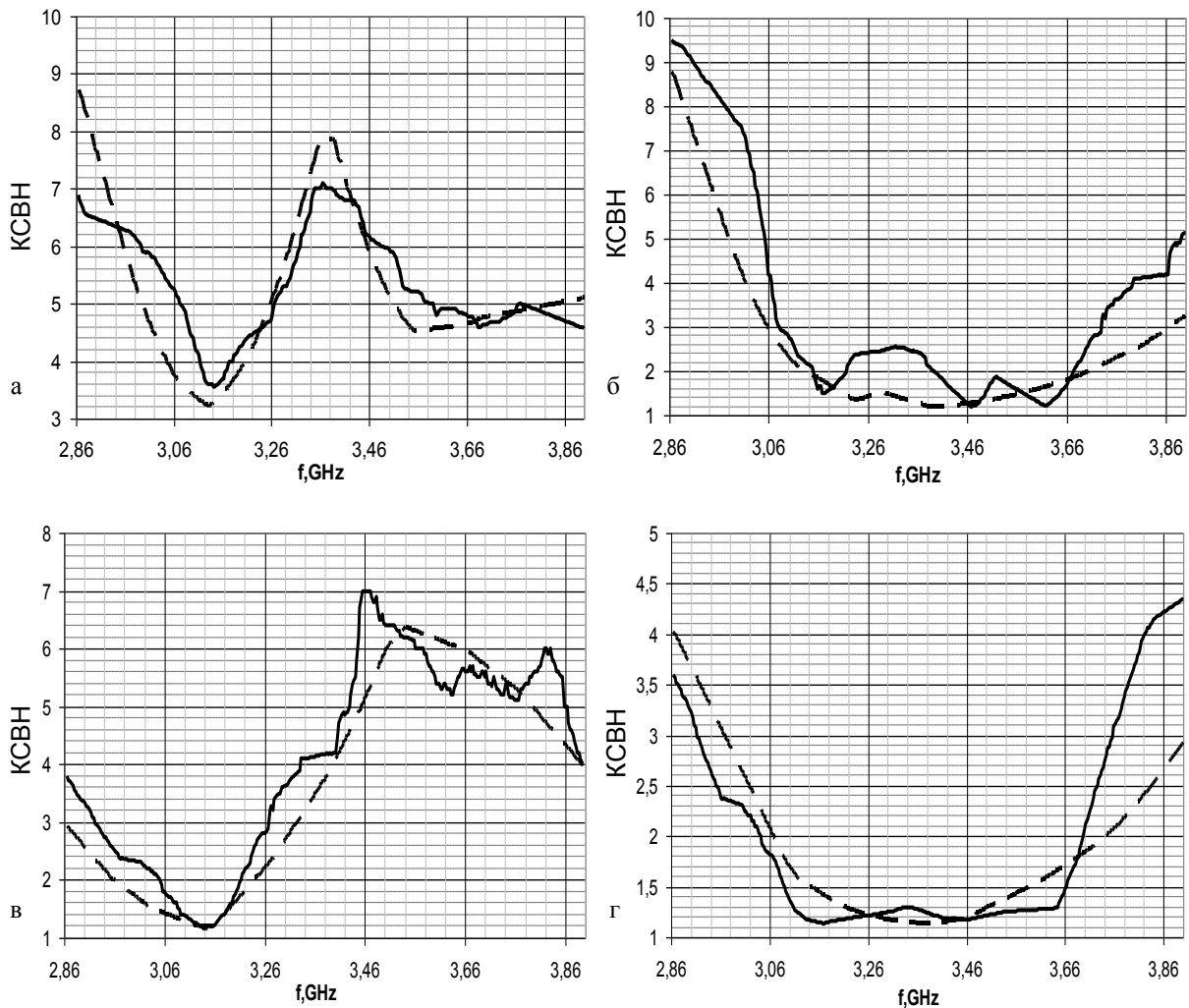


Рис. 1. Зависимость КСВН петлевой вибраторной антенны А.А. Пистолькорса от частоты: а – без настроечных элементов; б – со штыревым настроечным элементом вблизи вибратора; в – с настроечным диском вблизи экрана; г – со штырем вблизи вибратора и диском вблизи экрана совместно (— — расчет; — эксперимент)

Результаты расчетов и измерений других вариантов антенн (антенны 1, 2 и 3), обладающих резонансными свойствами, привели к таким же выводам, подтверждающим возможность согласования

вибраторов с фидерным трактом. Оказалось также, что эти антенны более узкополосны по сравнению с петлевым вибратором, что объясняется большей добротностью их резонансов.

Рассмотрим далее характеристики направленности исследуемых антенн. Так как размеры согласующих элементов в принципе сравнимы с длиной волны, возможно их существенное влияние на диаграмму направленности антенны. Для изучения этого эффекта рассчитывались и измерялись диаграммы направленности всех четырех ненастроенных и настроенных вариантов антенны в главных плоскостях наблюдения (электрического и магнитного векторов поля) на трех частотах в пределах рабочей полосы частот. Типичные результаты приведены для несогласованного петлевого вибратора на рис. 2, согласованного штырем, расположенным на расстоянии около 0,005 длины волны от экрана – на рис. 3 и широкополосного согласованного штырем и диском совместно – на рис. 4.

Приведенные на рисунках расчетные и экспериментальные диаграммы направленности получены на частоте 3,13 ГГц, на которой, как видно из рис.1, антенна без согласующих элементов имеет минимальный КСВН, а КСВН согласованных антенн равен 1,2...1,4. На других частотах и расчетные, и измеренные диаграммы направленности близки к приведенным.

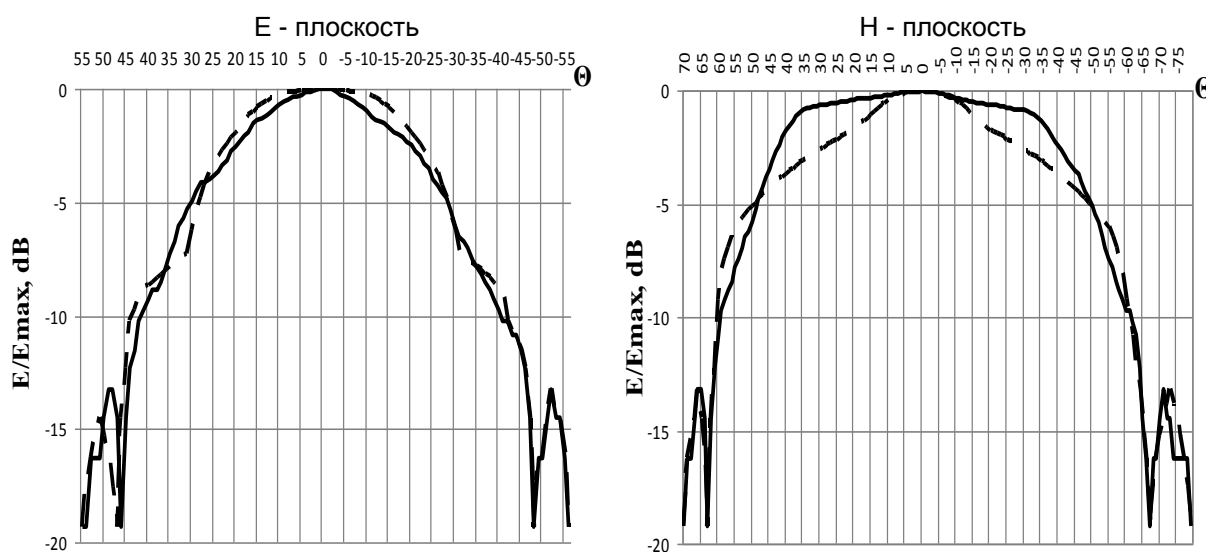


Рис. 2 Диаграммы направленности петлевого вибратора с экраном без согласующих элементов (— расчет; — эксперимент)

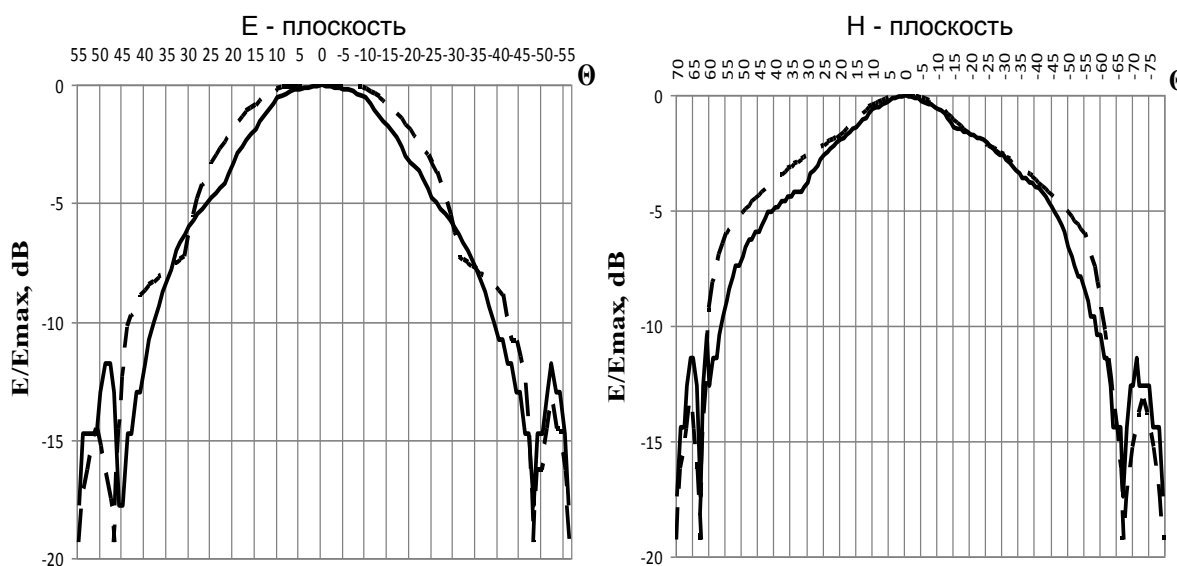


Рис. 3 Диаграммы направленности настроенного петлевого вибратора с экраном со штыревым согласующим элементом (— расчет; — эксперимент)

E - плоскость

H - плоскость

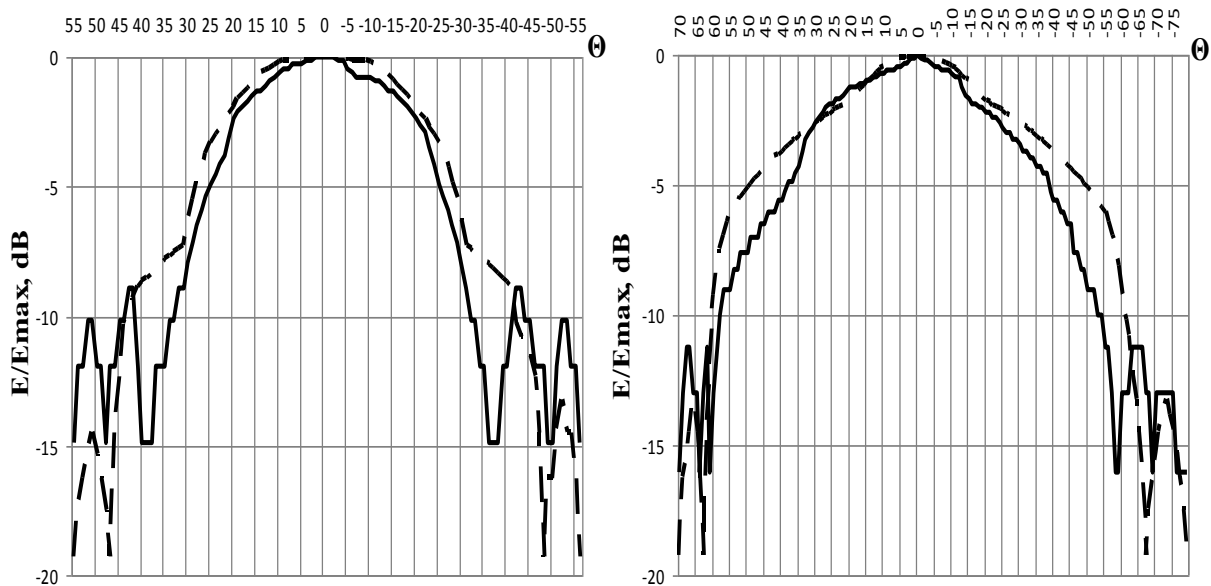


Рис. 4 Диаграммы направленности настроенного петлевого вибратора с экраном со штыревым и дисковым согласующим элементом (— расчет; — эксперимент)

Из всех полученных результатов исследований можно сделать вывод, что согласующие элементы слабо влияют на диаграмму направленности – не больше 1 – 2 дБ в главном лепестке, и не больше 2...2,5 дБ в боковых лепестках. Отметим, что расчет и эксперимент наиболее близки для варианта антенны без настроечных элементов. Во всех полученных результатах расчетов и измерений диаграмм направленности расчетный главный лепесток шире измеренного, а уровни боковых лепестков – ниже. Экспериментальные результаты до относительных уровней поля -10...-15 дБ отличаются мало. Теоретические результаты отличаются несколько больше. Анализ расчетов и измерений диаграмм направленности других типов антенн привел к тому же выводу: влиянием согласующих элементов, размещаемых в области между вибратором и экраном, на диаграммы направленности симметричных вибраторных антенн, расположенных параллельно экрану, на практике можно пренебречь.

ВЫВОДЫ

1. Предложен и теоретически и экспериментально апробирован способ согласования симметричных вибраторных антенн, расположенных параллельно плоскому идеально проводящему экрану, с коаксиальным фидерным трактом, за счет штыревых и/или дисковых согласующих элементов, размещенных в ближней зоне вибратора в объеме между вибратором и экраном. Показано что штыревые согласующие элементы сильнее влияют на согласование антенны при их размещении вблизи вибратора, а дисковые – вблизи экрана. Предложенный способ позволяет перестраивать частоту, на которой имеет место минимум КСВН, и увеличивать полосу рабочих частот вибраторных антенн с экранами.

2. Предложенный способ согласования вибраторной антенны с фидерным трактом может быть использован в случае коаксиального фидерного тракта с другим волновым сопротивлением, а также полосковых линий передачи.

3. Согласование вибраторной антенны с фидерным трактом различными неоднородностями в области между вибратором и экраном позволяет корректировать и исправлять характеристики вибраторных антенн при различных дефектах их изготовления.

4. Теоретически и экспериментально показано, что влияние согласующих элементов между вибратором и экраном на диаграммы направленности вибраторных антенн с плоскими экранами пренебрежимо мало.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: «Высшая школа». 1988. – 432 с.
2. Лавров А.С., Резников Г.Б. Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов. радио. 1974. – 367с.
3. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием ФЕКО. – М.: Солон-Пресс. 2017. – 412с.