

Моделирование излучающих многопортовых СВЧ-структур

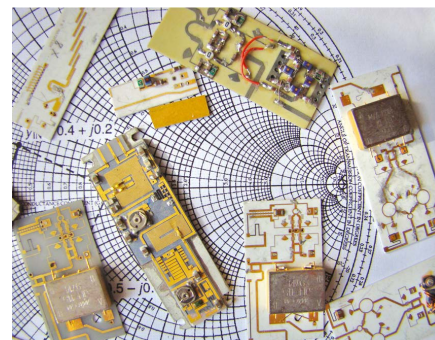
Александр Курушин (Москва)

Автор выражает благодарность сотрудникам МКБ «Компас» П.А. Вьюгину, А.С. Герасимову, С.В. Матвееву и особенно к.т.н. А.Г. Давыдову за помощь в работе.

На примере двухпортовой антенны типа «бабочка» рассмотрены особенности моделирования многопортовых излучающих СВЧ-структур. В статье рассматривается питание вибраторной антенны в идеализированном случае однопортового и двухпортового возбуждения, а также при использовании чипа, распределяющего сигналы по каналам.

Электродинамическое моделирование СВЧ-структур, в которые включены как пассивные, так и активные компоненты, позволяет учесть электродинамическую связь между отдельными фрагментами структуры. Ключевым вопросом при этом является установка граничных условий и моделирование портов, т.е. устройств ввода и вывода энергии, и их согласование с излучающей структурой.

В программе FEKO реализованы разнообразные порты: волноводные, дискретные, микрополосковые, порты на ребре и др. [1]. Они предназначены для ввода энергии в структуру и расчёта S-параметров, связывающих падающие и отражённые волны в портах. Порты могут объединять неизлучающие компоненты и части, работающие на излучение, подобно антенным системам.



Чтобы пояснить, в чём заключаются особенности постановки портов в структуру, рассмотрим антенну типа «бабочка» (BowTie). На рисунке 1 такая антенна с расширяющимися вибраторами возбуждается одним портом, подключённым своими концами к вибраторам.

С другой стороны, возбудить антенну «бабочка» можно, используя два порта, как показано на рисунке 2. Это соответствует включению антенны в излучающую СВЧ-структуру, которую часто называют активной антенной. Если антенна подключается к СВЧ-микросхеме, то каждый её вибратор запитывается отдельным портом (см. рис. 2).

На практике подобная задача возникает, когда необходимо запитать излучающую структуру с помощью нескольких портов, как это делается, например, в квадрилярной антенне, исследованной в литературе [2]. В той же работе приводится важная формула, которая учитывает взаимные связи в таких многопортовых излучающих системах.

Вместо одного порта (см. рис. 1) на рисунке 2 показана двухпортовая схема, причём порты запитываются через отрезок линии, в качестве которой выступает плата заземления. Например, такое включение реализуется, когда излучающая структура запитывается через микросхему с выходными портами (чипом), выполняющую деление мощности и разводку фаз.

Рассмотрим проектирование такой структуры с помощью программы

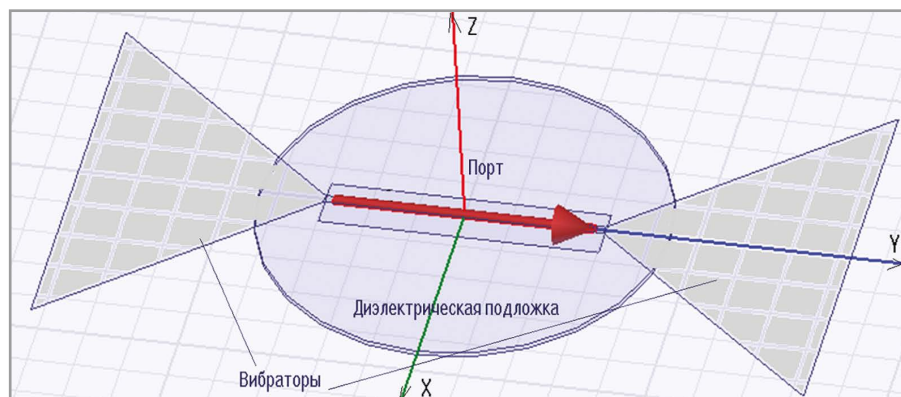


Рис. 1. Структура антенны типа «бабочка», запитываемой с помощью одного порта

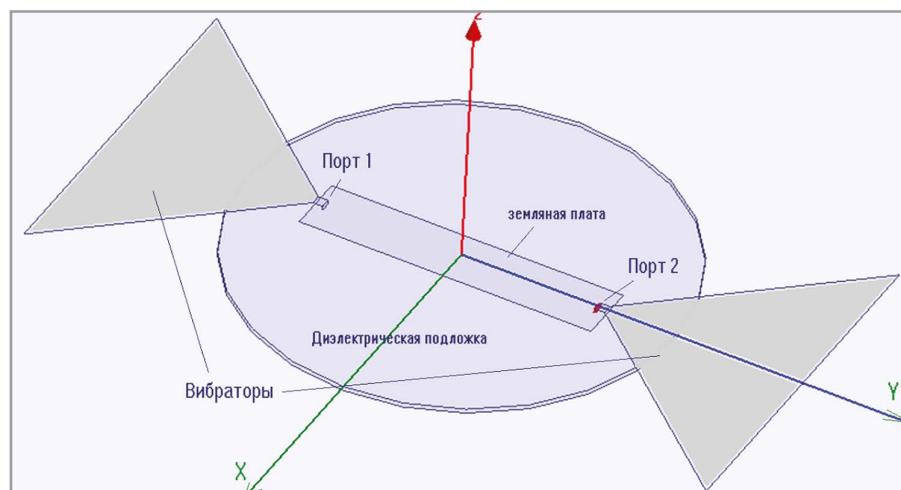


Рис. 2. Антенна типа «бабочка» с двумя портами питания

электродинамического моделирования FEKO.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ С ОДНИМ И ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрим схему возбуждения антенны «бабочка» с помощью одного или двух источников (см. рис. 1 или 2, соответственно).

В первом случае в центр антенны устанавливается источник, и коэффициент отражения от него рассчитывается как отношение отражённой волны к падающей в линии между антенной и источником. Сопротивление источника в этом случае равно 0, а коэффициент отражения рассчитывается по напряжению и току на сегменте порта. В этом случае он равен величине S_{11} (в однопортовом случае имеется единственный S -параметр). Поскольку $\Gamma = S_{11}$ для любого выбранного опорного импеданса, частотные зависимости для вибратора с одним портом совпадают. Так, если опорный импеданс составляет 50 Ом, то:

$$S_{11} = \frac{50 + Z_{вх}}{50 - Z_{вх}} \quad (1)$$

Теперь возбудим вибраторную антенну двумя портами. Излучающие свойства вибраторной антенны и распределение тока вдоль линии не изменятся, так же, как и коэффициент направленного действия (КНД) антенны. Для полуволнового вибратора КНД = 1,63 dBi. Любое количество источников, подключённых в любых точках, дадут картину поля, зависящую только от структуры, но не от способа возбуждения.

При включении двух портов питания равенство $|S_{11}|$ и $|\Gamma|$ уже не обеспечивается (см. рис. 3). Этот, на первый взгляд, неожиданный результат связан с особенностями расчёта S -параметров в программе FEKO, а также с тем, что при расчёте коэффициента отражения через S -параметры в многопортовой схеме следует учитывать взаимную связь между портами.

Если теперь применить формулу $S_{11_корр} = S_{11} + S_{12}$ [2], то коэффициент отражения совпадает со скорректированным параметром $\Gamma_1 = |S_{11_корр}|$. Этот факт, использованный при анализе квадрифилярной антенны [2], применим для антенны «бабочка» с дву-

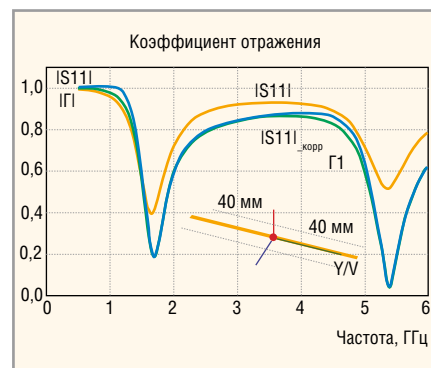


Рис. 3. Частотная характеристика вибраторной антенны, рассчитанная с учётом влияния частот антенны ($|S_{11_корр}|$) и без учёта их влияния ($|S_{11}|$), а также коэффициент отражения $|\Gamma_1|$, рассчитанный в однопортовой схеме

мя портами. Суммирование комплексных чисел для расчёта $|S_{11_корр}|$ в программе FEKO выполняется на этапе постпроцессорной обработки с помощью калькулятора, оперирующего действительными и мнимыми частями комплексных чисел:

```
SQRT((self + ReS12)*(self +
+ ReS12)+ (ImS11 + ImS12)*(ImS11 +
+ ImS12)).
```

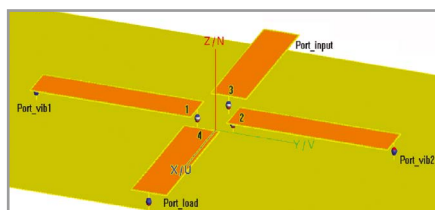


Рис. 4. Фрагмент физического включения ИС с портами 1–4 в активную антенну

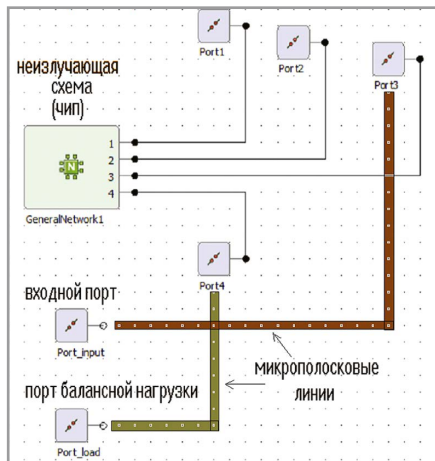


Рис. 5. Схема объединения портов антенны «бабочка» и направленного ответвителя (ИС)



Рис. 6. Коэффициент отражения со стороны входного разъёма антенны «бабочка», отдельные вибраторы которой запитываются с помощью ИС

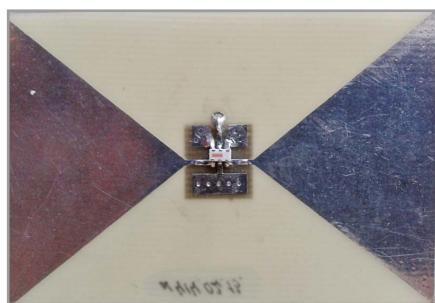


Рис. 7. Внешний вид антенны «бабочка»

Частотные характеристики S-параметров двухпортовой структуры, коэффициент отражения от одного порта и $S_{11_корр}$, который рассчитан по формуле $S_{11} + S_{12}$ (т.е. учитывает взаимную связь), приведены на рисунке 3.

Отметим, что при последовательном соединении двух портов опорный импеданс должен быть выбран таким

же, как и в однопортовой схеме возбуждения, т.е. 50 Ом.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ «БАБОЧКА» С ВКЛЮЧЕНИЕМ СХЕМЫ ДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ И РАЗВОДКИ ФАЗ

Антенна «бабочка» представляет собой модернизированную вибраторную антенну, у которой вибраторы расширяются к концам. Это придаёт антенне новые свойства, в частности, расширяет диапазон рабочих частот [3, 4]. Можно показать, что фазовый центр этой антенны не зависит от частоты и находится в её геометрическом центре. Антенну типа «бабочка» нередко используют в активном режиме, подавая сигнал на вход усилительной микросхемы. Объединение входного порта усилителя с двумя портами антенны «бабочка» можно выполнить с помощью трансформатора [5].

Два порта структуры двухпортовой антенны должны возбуждаться в противофазе, поэтому одним из вариантов возбуждения антенны «бабочка» является её подключение к двум источникам сигналов, сдвинутых по фазе на 180°. С этой целью в порты питания антенны устанавливается микросхема (см. рис. 4). Чтобы получить антенну «бабочка» с линейной поляризацией, используем микросхему, S-параметры которой описываются выражением (2). Это – идеальный делитель мощности, сдвигающий фазы на портах 2 и 3 на 180°.

Входной порт (присоединяемый к входной коаксиальной линии) подключается к порту 3 ИС, а порты 1 и 2 подключаются к вибраторам антенны. Порт 4 ИС через отрезок микрополосковой линии подключается к балансной нагрузке. Микросхема (направленный ответвитель, состоящий из трёх трансформаторов RF Trans [5]) имеет на рабочей частоте матрицу рассеяния:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0.707 & 0.707\angle 180^\circ & 0 \\ 0.707 & 0 & 0 & 0.707\angle 180^\circ \\ 0.707\angle 180^\circ & 0 & 0 & 0.707 \\ 0 & 0.707\angle 180^\circ & 0.707 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Четырёхпортовая схема с этой матрицей рассеяния включается в структуру как неизлучающий четырёхпортовый объект с помощью схемы, показанной на рисунке 5. Рассчитанная с помощью программы FEKO частотная характеристика антенны типа «бабочка» приведена на рисунке 6.

Спроектированную антенну «бабочка», макет которой показан на

рисунке 7, можно использовать в качестве излучающей антенны в малогабаритной безэховой камере (см. рис. 8), предназначенной для проверки антенных устройств GLONASS и GPS. Благодаря широкой полосе (см. рис. 6) и стабильности фазового центра антенны, такая малогабаритная безэховая камера работает в диапазоне частот 1...6 ГГц.

В этом случае методика измерения шумовых характеристик реализуется так, что мощность, излучаемая шумовой трубкой с помощью антенны «бабочка» (в верхней части камеры, см. рис. 8), принимается испытываемой активной антенной и затем складывается с тепловыми шумами входного СВЧ-усилителя (с учётом диаграммы направленности антенной системы активной антенны).

При оценке шумовых свойств антенного тракта должны учитываться все источники флуктуаций. Они влияют на такую обобщённую характеристику, как эффективная температура антенны, которая показывает дополнительный шумовой вклад в антенный тракт. Очевидно, что эффективная температура антенны зависит от её диаграммы направленности (см. рис. 9) и тепловых потерь.

Коэффициент шума является универсальной характеристикой, используемой для сравнения шумовых свойств систем и устройств. В измерителе коэффициента шума на вход испытываемого четырёхполюсника воздействует калиброванный шум (шумовая трубка) и измеряется коэффициент шума [6]:

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.г.вых}} \quad (3)$$

где $P_{ш.вых}$ – мощность на выходе при воздействии всех источников шума, $P_{ш.г.вых}$ – мощность шума на выходе, определяемая только мощностью генератора шума на входе (при идеализации исследуемой активной антенны).

Такая схема измерения коэффициента шума «на проход» может использоваться для тестирования и исследования активных спутниковых антенн.

Выводы

В статье рассмотрены различные способы возбуждения структуры антенны типа «бабочка», состоящей из двух вибраторов с отдельным питанием. Показано, как излучающая часть антенны объединяется с неизлучающей схемой (ИС, усилителем) и описан расчёт характеристик активной антенны.

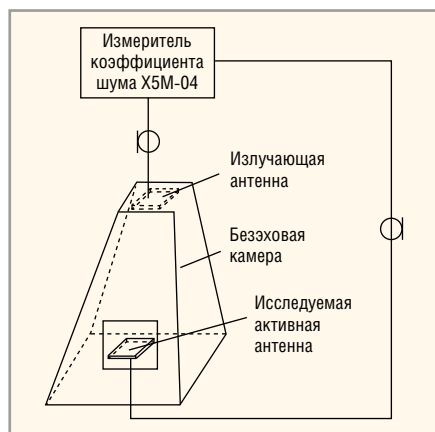


Рис. 8. Схема измерения коэффициента шума активной антенны «на проход»

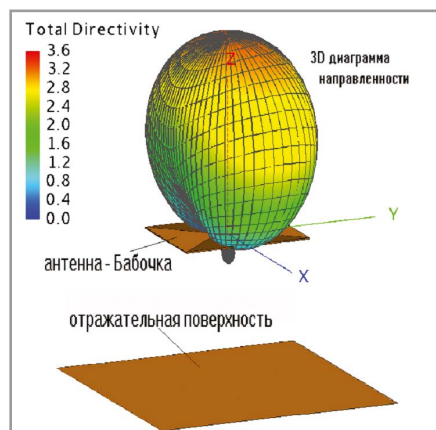


Рис. 9. Трёхмерная диаграмма направленности активной антенны

Изложенный подход позволяет выполнить электродинамический анализ многопортовых систем с учётом электродинамической связи отдельных частей структуры, а также включённых в неё частотных зависимостей ИС и дискретных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.feko.info (поддержка пользователей программы FEKO)
2. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А. Расчёт квадрифилярной антенны. Современная электроника. № 7. 2007. С. 54–57.
3. Microwave and Millimeter Wave Circuits and Systems Emerging Design, Technologies, and Applications. Editors: Apostolos Georgiadis, Hendrik Rogier, Luca Roselli, Paolo Arcioni. John Wiley & Sons. 2013.
4. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ-устройств с использованием FEKO. OneBook. 2013.
5. Ultra-Small Ceramic Power Splitter/Combiner. www.minicircuits.com.
6. Guillermo Gonzalez. Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design. 1997. ©