

09, сентябрь 2015

УДК 621.396.67

Моделирование эталонных параметрических отражателей

*Зубарев Ал. С., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

*Научный руководитель: Овечкин В.С., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»
main@rl1-11.bmstu.ru*

В радиолокации часто требуется калибровка приёмника РЛС. При этом необходимо применение эталонного отражателя с известной ЭПР. В данной статье рассматривается отражатель, в основе которого лежит полуволновый дипольный вибратор. При работе с отражателями, расположенными вблизи земли, возникает проблема с их обнаружением, так как отражение от близлежащих объектов и подстилающей поверхности может превышать отражённый от вибратора сигнал на 25...50 дБ.

Для решения этих проблем применяется скачкообразная модуляция электрической длины вибратора, в результате которой в спектре отражённого сигнала вследствие его угловой модуляции появляются новые гармонические составляющие, сдвинутые относительно несущей частоты на частоту модуляции. В итоге появляется возможность выделить отражённый от вибратора сигнал и измерить его амплитуду.

Модуляция дипольного вибратора может осуществляться двумя способами:

- вращением вибратора;
- изменением электрической длины вибратора.

На практике удобнее пользоваться неподвижными отражателями. Для модуляции неподвижного вибратора необходимо менять его электрическую длину. Это можно осуществить путем установки в центре проводника ключа, который будет замыкать и размыкать плечи вибратора. Вследствие работы ключа, в спектре модулированного сигнала появятся дополнительные гармоники на частотах $f \pm n \cdot \Omega$, $n = 1, 2, \dots$, где f –

частота несущей зондирующего сигнала РЛС, Ω – частота переключения ключа. В качестве ключа можно использовать *pn*-диод, *pin*-диод, транзистор и так далее.

В пакете прикладных программ для электродинамического моделирования невозможно получить поочередное замыкание и размыкание ключа во времени, поэтому при моделировании антенной решётки из полуволновых дипольных вибраторов модуляция имитируется изменением направления падающей волны, когда только один из вибраторов замкнут, а остальные разомкнуты.

Используя принцип модуляции можно получить эталонные параметрические отражатели. В данной работе рассмотрены две задачи с взаимоисключающими требованиями:

- получение эталонного параметрического отражателя с изотропной ЭПР;
- получение эталонного параметрического отражателя с максимальным значением ЭПР.

Для эталонных отражателей в диапазоне метровых длин волн наиболее подходят полуволновые дипольные вибраторы. По сравнению с уголковыми отражателями они имеют более высокое значение ЭПР при сравнимых геометрических размерах. Другим важным свойством дипольного вибратора является его изотропная ЭПР. Свойство изотропности необходимо, когда неизвестно точное взаиморасположение отражателя и приемника РЛС.

Так как параметрический эталонный отражатель будет состоять из полуволновых дипольных вибраторов, необходимо проверить соответствие результатов моделирования с теоретически рассчитанной ЭПР одного вибратора.

Для расчёта ЭПР вибратора используют формулу:

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{E_{отр}^2}{E_{пад}^2} = 4\pi \left(\frac{60\pi h_0^2}{\lambda |Z_\Sigma|} \right)^2, \quad (1)$$

где σ – ЭПР вибратора;

r – расстояние от вибратора до точки наблюдения;

$E_{отр}$ – амплитуда поля обратного вторичного излучения в точке приёма;

$E_{пад}$ – амплитуда поля падающей на вибратор ЭМВ;

$h_0 = \frac{\lambda}{\pi}$ – действующая высота вибратора;

λ – длина волны;

Z_Σ – сопротивление излучения вибратора.

Известно сопротивление излучения симметричного полуволнового вибратора:

$$Z_{\Sigma} = R_{\Sigma} = 73,1 \text{ Ом},$$

поэтому для частоты f_0 получим:

$$f_0 = 163,7 \text{ МГц},$$

$$\lambda_0 = 1,831 \text{ м},$$

$$\sigma_{opt} = 2,877 \text{ м}^2.$$

Для расчёта использовался пакет программ для электродинамического моделирования FEKO 5.2.

ЭПР оказалась равной $2,833 \text{ м}^2$. Если сравнить результаты объемного моделирования с теоретическими, то отличие составляет 1,53 %. Это связано с тем, что формула (1) справедлива только бесконечно тонкого диполя.

Тонкий полуволновый вибратор всегда имеет мнимую часть сопротивления. Это означает, что на практике для настройки вибратора в резонанс необходимо укоротить его плечи. Для этого используется коэффициент укорочения k :

$$l_d = k \cdot \frac{\lambda}{2},$$

где l_d – действующая длина полуволнового вибратора;

k – коэффициент укорочения.

В результате оптимизации k с целью настройки длины вибратора в резонанс (достигалось нулевое значение мнимой части комплексного входного сопротивления вибратора, $Im(Z_{вх}) = 0$), получили $\sigma_{opt} = 2,833 \text{ м}^2$ и $Z_{вхрез} = R_{вхрез}$ Ом. Также была проведена оптимизация k для получения максимальной ЭПР. В результате получили $\sigma_{opt} = 2,848 \text{ м}^2$ при значении коэффициента $k = 0,94$. От теоретически рассчитанной ЭПР отличается на 1 %. При этом входное комплексное сопротивление вибратора составляет $Z_{вхopt} = 70,63 - 4,85i$ Ом.

На рисунке 1 приведена зависимость ЭПР от угла места при $k = 1$, $k = k_{opt} = 0,94$ и при $k_{рез} = 0,9457$.

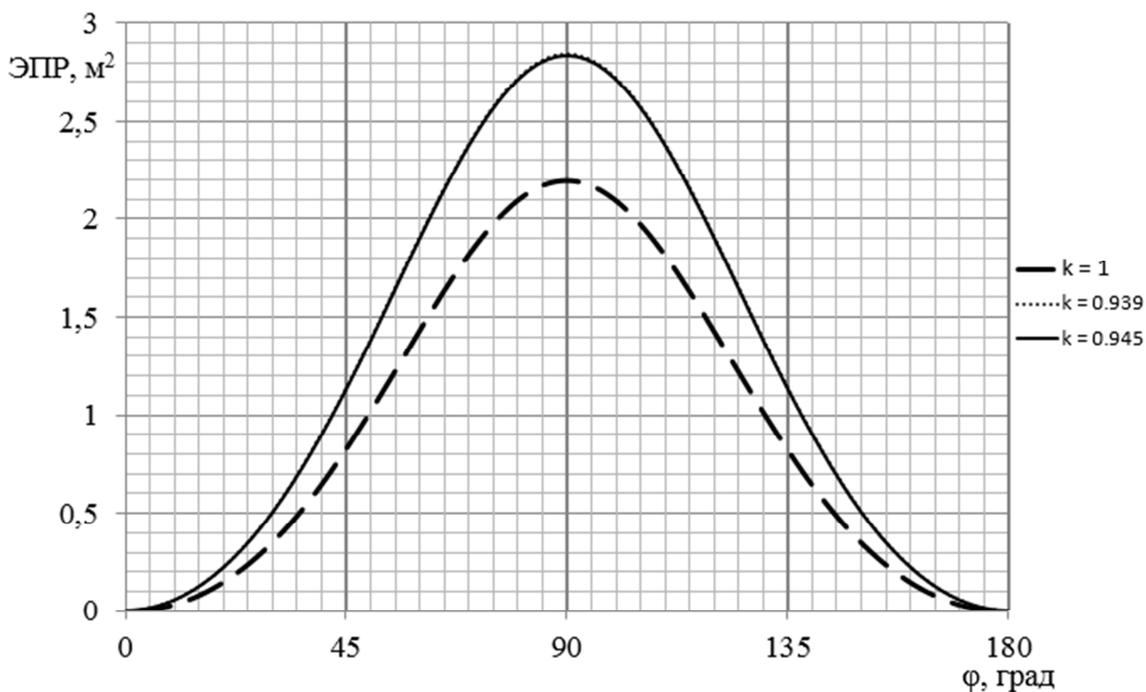


Рис. 1. ЭПР дипольных отражателей с различными коэффициентами укорочения

Зная коэффициент укорочения можно приступить к моделированию параметрического эталонного отражателя с изотропной ЭПР.

При моделировании один из вибраторов замкнут, а остальные имеют разрыв в центре, имитируя работу ключа. Для того чтобы разрыв не оказал большое влияние на значение ЭПР, его длина составляет $\frac{\lambda}{60}$. Поочерёдное замыкание и размыкание ключей имитируется изменением направления падающей волны.

При рассмотрении различных вариантов конструкций антенной решётки было обнаружено, что для получения изотропной ЭПР на одном вибраторе необходимо устанавливать 3 ключа вместо одного. Конструктивно, один из ключей находится в центре полуволнового дипольного вибратора, а остальные два – в середине каждого плеча.

Для получения изотропной ЭПР было рассмотрено несколько вариантов конструкций с различными вариантами оптимизации:

- квадратная антенная решётка с 4 вибраторами (рисунок 2);
- цилиндрическая антенная решётка с 8 вибраторами (рисунок 3).

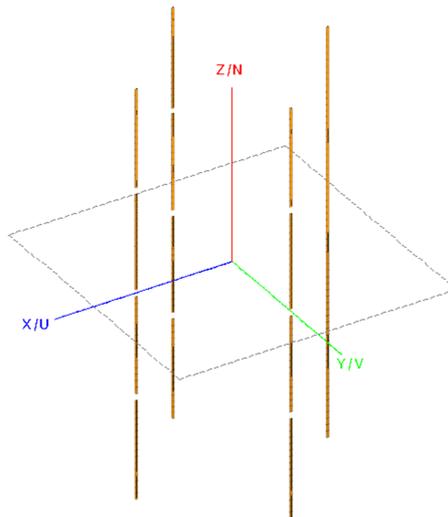


Рис. 2. Квадратная антенная решётка

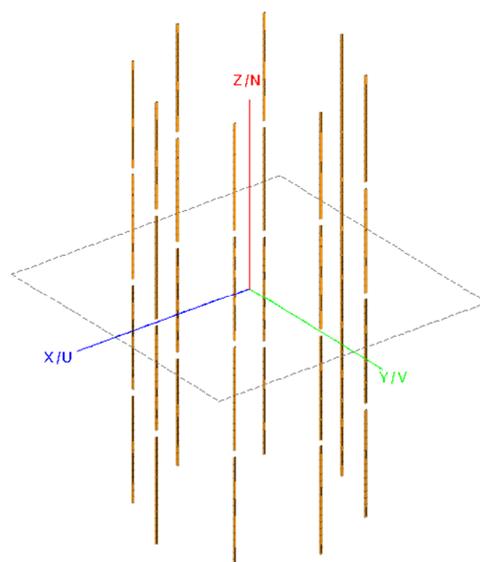


Рис. 3. Цилиндрическая антенная решётка

Вибраторы расположены на образующей цилиндра радиусом r . Параметром оптимизации является r . В таблице представлены результаты моделирования:

Кол-во вибраторов, шт	Тип решетки	ЭПР _{max} , м ²	ЭПР _{min} , м ²	ΔЭПР	r, м	Оптимизация
8	цилиндрическая	3,141	2,741	0,400	0,200	–
8	цилиндрическая	3,492	2,641	0,851	0,341	ЭПР _{max}
8	цилиндрическая	2,849	2,834	0,015	0,076	max(ЭПР _{min})
4	квадратная	2,969	2,788	0,182	0,200	–
4	квадратная	3,145	2,586	0,559	0,749	ЭПР _{max}
4	квадратная	2,842	2,837	0,005	0,066	max(ЭПР _{min})

В ходе анализа полученных данных было обнаружено, что изотропной ЭПР обладает квадратная антенная решётка с $r = 0,66$ м.

Второй целью работы является моделирование параметрического эталонного отражателя с максимальным значением ЭПР.

Для получения максимального значения ЭПР была выбрана плоская антенная решётка с 4 полуволновыми дипольными вибраторами (рисунок 4), расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга равно $\frac{\lambda}{2}$. Количество вибраторов выбиралось исходя из следующих соображений: два вибратора дают небольшое значение ЭПР, а шесть и более образуют недостаточно прочную конструкцию.

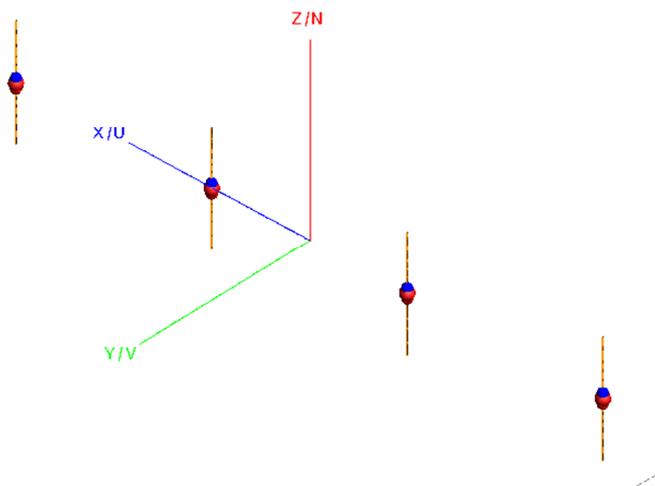


Рис. 4. Плоская антенная решётка

Порядок выполнения моделирования:

- 1) моделирование 4 вибраторов, один из которых замкнут, а другие имеют разрывы;
- 2) установка портов в разрыв и исследование сопротивления вибратора относительно порта при облучении плоской волной;
- 3) подключение к портам согласованной нагрузки с сопротивлением, равным сопротивлению вибратора относительно порта;
- 4) отключение портов и исследование напряжения на нагрузке при облучении плоской волной;
- 5) подключение портов с напряжением, равным напряжению на нагрузке;
- 6) моделирование с несколькими источниками энергии в системе: плоской волны и портов с напряжением, полученным в четвёртом пункте.

В результате моделирования получаем значение поля в дальней зоне. После преобразований получаем значение ЭПР $\sigma = 24,381 \text{ м}^2$ (рисунок 5)

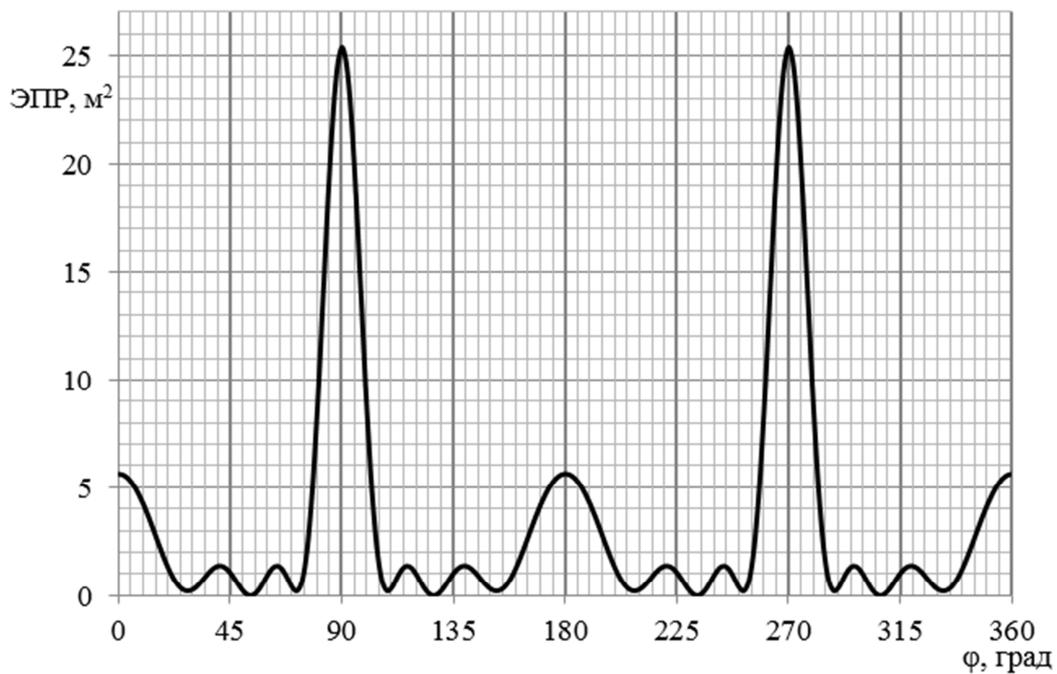


Рис. 5. ЭПР плоской антенной решётки

После оптимизации расстояния между вибраторами (r) значение ЭПР составило $\sigma = 334,659 \text{ м}^2$, а $r = 0,69 \text{ м}$ (рисунок 6).

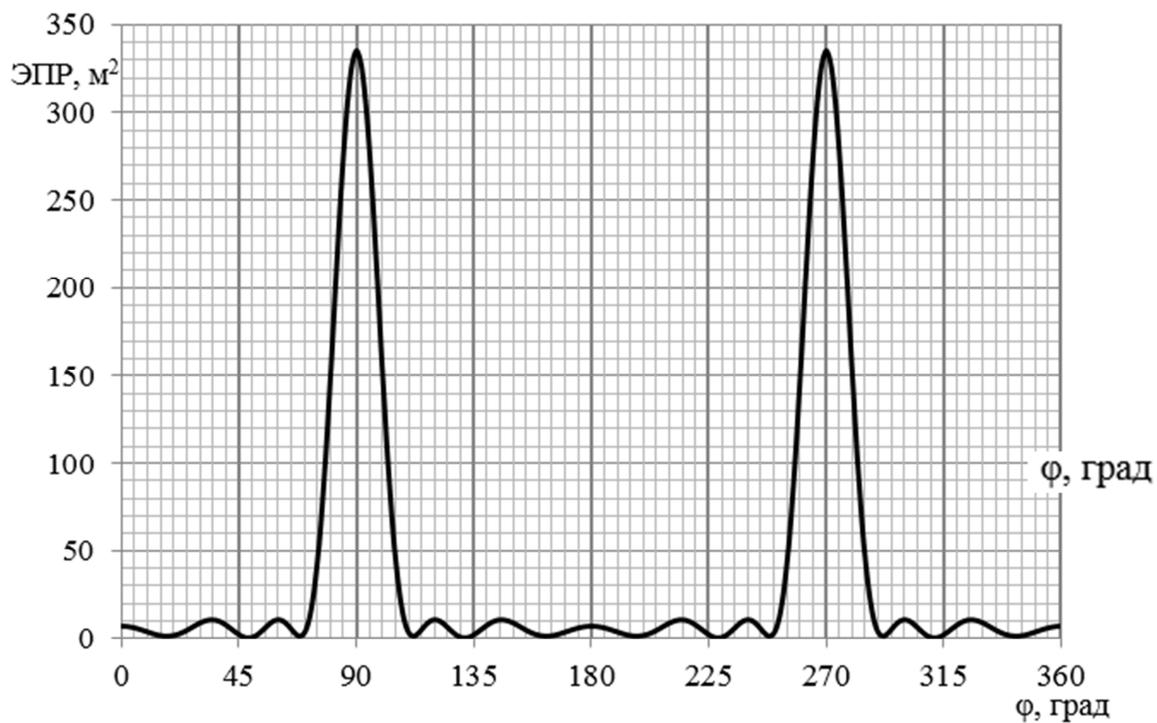


Рис. 6. Плоская оптимизированная антенная решётка

В результате моделирования были получены следующие результаты:

– определена конструкция эталонного параметрического отражателя с изотропной ЭПР. Она представляет собой квадратную антенную решётку из 4 вибраторов с шагом 0,66 м;

– получен эталонный параметрический отражатель с максимальным значением ЭПР. Она представляет собой плоскую антенную решётку из 4 вибраторов с шагом 0,69 м. ЭПР данного отражателя составило 334,659 м².

Список литературы

1. Устройства СВЧ и антенны. В 2 ч. Ч. 1. Проектирование, конструктивная реализация, примеры применения устройств СВЧ / ред. В. А. Неганов, Д. С. Ключев, Д. П. Табаков. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 608 с.
2. Батурин А. С., Крючков И. В., Кузнецов А. А., Нефедов С. И., Слукин Г. П., Шустиков В. Ю. Параметрический эталонный отражатель: пат. 2277741 Российская Федерация. 2004. Бюл. № 16. 3 с.
3. Банков С. Е., Курушин А. А. Практикум проектирования СВЧ структур с помощью ФЕКО. М.: ЗАО «НПП РОДНИК», 2009. 200 с.
4. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975. 248 с.