

Формирование диаграммы направленности волноводно–щелевой антенны с учетом поверхностных переотражений

Представлены результаты расчетов, конструкторской разработки и экспериментальных исследований волноводно-щелевой антенны K_u диапазона радиоволн. Показано влияние конструктивных элементов антенны, входящей в состав радиолокатора ближнего действия РС-50, на её диаграмму направленности. Сформулирована потребность в использовании дополнительных элементов конструкции антенны в составе радиолокатора.

Ключевые слова: Волноводно-щелевая антенна, радиолокатор ближнего действия, диаграмма направленности, элементы конструкции антенны.

Для решения задачи фиксации быстродвижущегося объекта в ближней зоне возникла потребность создания специального радиолокатора. Радиолокатор должен контролировать пространство на высоте от 3 до 50 метров над земной поверхностью, при мощности излучения не превышающей 1.0 Вт.

Решение этой задачи представилось возможным, благодаря использованию в составе радиолокатора волноводно-щелевой антенны с плоской диаграммой направленности (ДН) и ПЛИС, формирующей команды управления излучением, приёмом и обработкой принятых сигналов. Плоская диаграмма направленности представляет собой сплошной сегмент пространства, узкий в одной плоскости и широкий в другой, перпендикулярной первой.

При проектировании волноводно-щелевых антенн (ВЩА) важным является выбор амплитудного распределения напряженности поля в волноводе, которое определяет количество щелей в антенне, углы их наклона. Выбирать ту или иную модель амплитудного распределения можно, исходя из ширины главного лепестка ДН, величины уровня боковых лепестков, а также направления плоскости поляризации электромагнитного излучения. Для проектируемого радиолокатора требовалась антенна с горизонтальной поляризацией и углом раскрыва ДН – не менее 55° . Возможные варианты распределений широко известны. Среди них линейное, косинусоидальное, степенное косинусоидальное и др.

При разработке ВЩА было принято косинусоидальное распределение с уровнем боковых лепестков в пределах от -17.1 до -22.4 дБ. Одновременно учитывалось, что каждому значению уровня боковых лепестков соответствует своё значение ширины ДН - $2\theta_{0.5}$, выраженное через отношение длины волны λ к длине антенны L . Между длиной щелевой антенны и величиной угла раскрыва главного лепестка ДН имеется однозначная связь [1] :

$$2\theta_{0.5} = K \frac{\lambda}{L}, \quad (1)$$

где K - коэффициент пропорциональности. Задавшись значением λ и величиной $2\theta_{0.5}$, из (1) определяется необходимая длина щелевой решётки. Число щелей, в свою очередь, вычисляется через длину антенны соотношением:

$$N = \frac{L}{d} + 1, \quad (2)$$

где d - шаг щелей относительно продольной оси волновода. Для нерезонансной антенны $d \neq n \frac{\lambda_g}{2}$, где n - целое число, λ_g - длина волны в волноводе, несколько большая, чем длина излучаемой антенной волны. Обычно шаг щелей в нерезонансных антеннах задают, исходя из условия:

$$d \approx 1.05 \frac{\lambda_g}{2}, \quad d \approx 1.05 \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda}{2a})^2}}, \quad (3)$$

где a - ширина волновода. Используя стандартный волновод сантиметрового диапазона сечением 23x10 мм. шаг щелей определили по формуле (3):

$$d = 1.05 \frac{0.04 \text{ м}}{2}, \quad d = 0.021 \text{ м}.$$

Используя (1) и (2), определили величины N и L для принятого косинусоидального амплитудного распределения при $2\theta_{0.5} = 4^\circ$. В результате вычислений определили количество щелей в волноводно-щелевой антенне и её длину 26 и 0.52 м. соответственно.

Воспользовавшись методом рекуррентных соотношений [2], с помощью которого находится связь между амплитудным распределением и распределением относительной мощности по щелям решётки, а также энергетическим методом [3], который определяет значения углов наклона щелей, вычислили эти углы относительно продольной оси волновода.

При расчёте ВЦА задавались распределением излучаемых мощностей P_n , амплитудным распределением $f(z_n)$ (z_n - координата n -го излучателя) и фазами Φ_n соответствующих каждой щели. Распределение излучаемых мощностей нормировали так, что

$$\sum_{n=1}^N P_n = 1 - \mu, \quad (4)$$

где $\mu = \frac{P_l}{P_0}$ - отношение мощности P_l , поглощаемой в нагрузке, к мощности P_0 на входе антенны (P_0 для упрощения расчётов приняли равной единице). Прежде всего, определялась величина нормирующего множителя σ , связывающего выбранное для расчёта амплитудное распределение с распределением относительных мощностей излучения. Для вычисления σ воспользовались уравнением:

$$\sigma = \frac{1 - \mu}{\sum_{i=1}^N f^2(z_i)}, \quad (5)$$

где μ - отношение мощности, поглощаемой в нагрузке, к мощности на входе антенны. При проведении расчетов μ принимали равным 0.1. Распределение относительных мощностей излучения щелей связано с амплитудным распределением следующей зависимостью [1]:

$$P_i = \sigma f^2(z_i), \quad (6)$$

где σ - нормирующий множитель. По известному распределению относительных мощностей, перешли к определению коэффициентов связи щелей с волноводом, для чего воспользовались рекуррентными соотношениями:

$$\alpha_1 = P_1, \alpha_2 = \frac{P_2}{(1 - P_1)}, \dots, \alpha_n = \frac{P_n}{[1 - (P_1 + P_2 + \dots + P_{n-1})]}, \quad (7)$$

где P_n - относительная мощность излучения n -ой щели. Далее рассчитали для каждой щели решётки эквивалентную нормированную проводимость:

$$g_n \approx \frac{\alpha_n}{(1 - \alpha_n)}. \quad (8)$$

Нормированные проводимости, связанные с углами наклона щелей [3], позволили получить угол наклона каждой щели. С учётом величин найденных коэффициентов:

$$g_i = 1.147 \left[\frac{\sin(\delta_i) \cos(1.191 \sin(\delta_i))}{1 - 0.575 \sin^2(\delta_i)} \right]^2. \quad (9)$$

Для простоты вычислений разложив (9) в ряд Маклорена по степеням δ_i , вычислили углы наклона щелей для косинусоидального распределения - $f(z_i) = \Delta + (1 - \Delta) \cos \frac{\pi \xi}{2}$.

Результаты вычислений приведены в таблице 1

Углы наклона щелей Таблица 1

i		0	1	2	3	4
δ_i	град	5°53'	6°48'	7°36'	8°21'	9°11'
i		5	6	7	8	9
δ_i	град	10°06'	10°57'	11°45'	12°37'	13°26'
i		10	11	12	13	14
δ_i	град	14°19'	15°10'	15°58'	16°50'	17°40'
i		15	16	17	18	19
δ_i	град	18°28'	19°14'	19°55'	20°34'	21°13'
i		20	21	22	23	24
δ_i	град	21°41'	22°00'	22°05'	21°55'	21°27'
i		25	26	27	28	29
δ_i	град	20°39'	19°25'			

На основе проведенных вычислений, была спроектирована и изготовлена волноводно-щелевая антенна локатора. Антенна в составе локатора РС-50 показана на рис.1 а.

Для уменьшения влияния боковых лепестков ДН на переотражение сигнала от подстилающей поверхности используются отражатели и боковые панели. Боковые панели снабжены горизонтальными рейками - СВЧ дросселями, расположенными снаружи устройства и зубчатыми краями. Геометрические размеры зубцов выбраны из соображений уменьшения влияния сигнала, отраженного от земли, т.е. для уменьшения вероятности ложного срабатывания локатора. Это последнее обеспечивается противофазностью электромагнитных волн от щелей и волн отраженных подстилающей поверхностью. Отражатели, расположенные под углом 120°, расположенные вдоль волноводно-щелевой решетки, дополнительно формируют заданную диаграмму направленности.

Радиопрозрачный обтекатель представляет собой стеклопластиковую трубу, обеспечивает герметичность конструкции локатора и способность выдерживать давление сверхзвуковой ударной волны.



а



б

Рис.1. Радиолокатор РС-50

а - вид без обтекателя, б - вид с обтекателем

Для проверки результатов проектирования и производства был произведен замер ДН устройства в безэховой камере, снабженной опорно-поворотным столом, эталонными излучателем и приемником, коллиматором, системой автоматического управления.

Локатор помещался на опорно-поворотное устройство, которое вращалось вокруг своей оси. Излучение радиолокатора отражалось от рефлектора коллиматора, и принималось эталонной антенной, усиливалось в приемнике, преобразовывалось в цифровой код, который поступал на управляющую ЭВМ. Уровень сигнала регистрировался управляющей ЭВМ и синхронизировался с углами разворота локатора относительно нормали к отражающей поверхности коллиматора. Результаты измерений приведены на рис. 2. Для уточнения влияния дополнительных элементов конструкции антенны и локатора измерения ДН проводились в трех вариантах сборки локатора.

Первоначально проводились измерения ДН локатора с антенной снабженной боковыми отражателями, расположенными в непосредственной близости от волновода. Результаты измерений на графике обозначены цифрой 3. Далее устанавливались боковые стенки локатора, на верхней поверхности которых были нарезаны зубцы. Дополнительно стенки для предотвращения переливания энергии снабжены дросселями в виде продольных желобов. Результаты измерения ДН локатора с боковыми стенками на рис.2 обозначены цифрой 1. Конструкция локатора РС-50, предназначенного для эксплуатации в полевых условиях снабжена герметичным радиопрозрачным обтекателем и герметизирующими защитными крышками. После окончательной сборки локатор был помещен на поворотный стол камеры и были проведены измерения ДН собранного локатора. Результаты измерений обозначены цифрой 2 на рис. 2.

Натурные испытания, проведенные в условиях открытого пространства, подтвердили работоспособность изготовленного радиолокатора РС-50. Радиолокатор фиксировал наличие объектов испытаний с эффективной поверхностью рассеивания, не превышающей 10^{-3} квадратного метра.

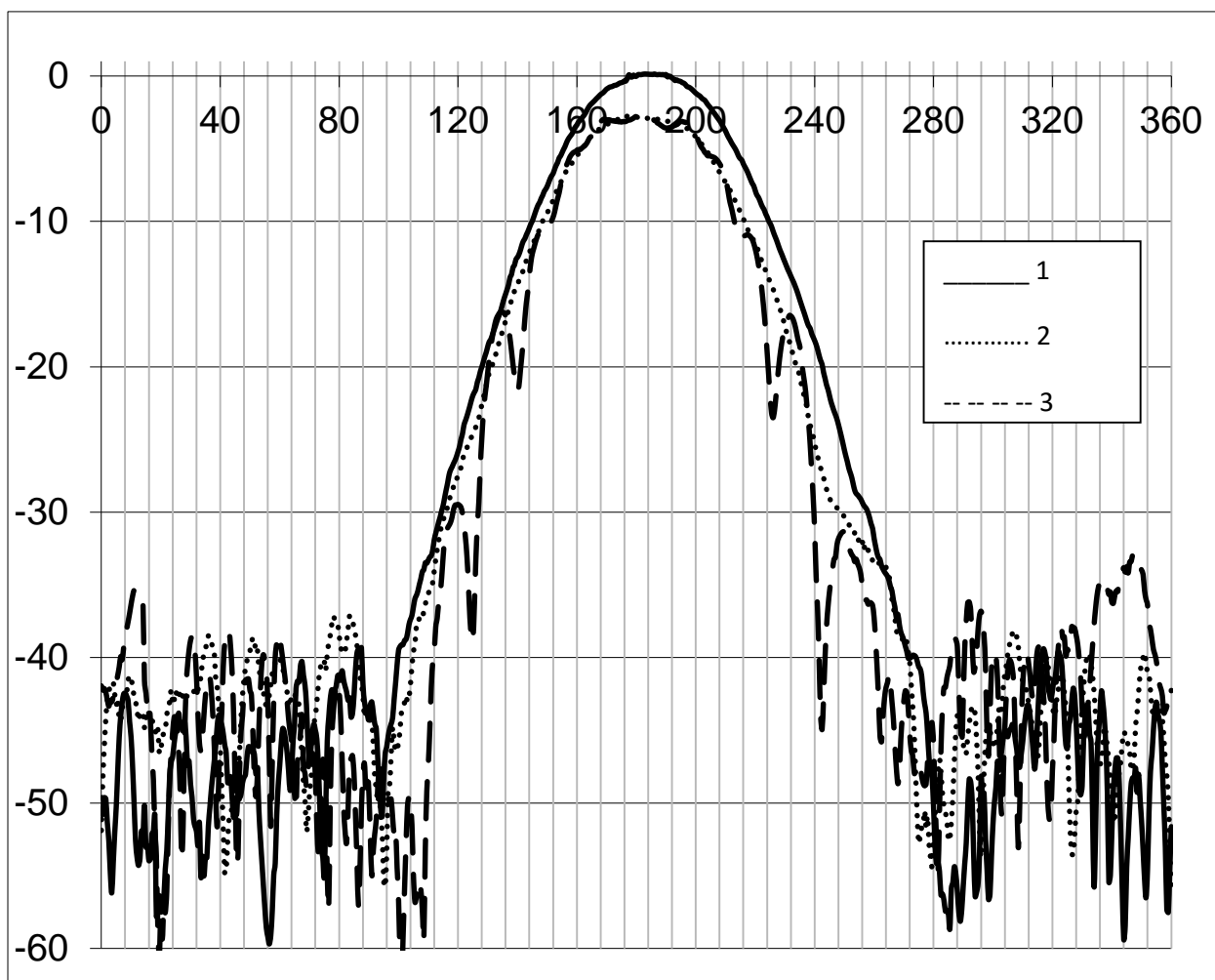


Рис.3. ДН антенны в трех комплектациях локатора.

Фактическая ширина диаграммы направленности ВЩА радиолокатора РС-50 с радиопрозрачным обтекателем на уровне 3 дБ составила величину порядка 50° .

Выводы

1. Методика расчета волноводно-щелевой антенны, основанная на [1], [2], [3], позволила рассчитать углы наклона щелей антенной решетки для формирования заданной диаграммы направленности антенны.

2. Измерения в безэховой камере подтвердили заданные характеристики и позволяют считать рассмотренный метод расчета волноводно-щелевой антенны корректным. Работоспособность РС-50 подтвердила необходимость дополнительных элементов конструкции антенны для уменьшения влияния поверхностных переотражений и мешающих отражений от земной поверхности.

Библиографический список

1. Антенны и устройства СВЧ под ред. Д. И. Воскресенского – М. : “Радио и связь”, 1994.
2. Айзенберг Г.З., Ямпольский В. Г. Антенны ультракоротких волн М.: “Связь”, 1997.
3. Устройства СВЧ и Антенны Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М. Учебник 2006.