

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ УСТРОЙСТВ СЛЕЖЕНИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ В ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИМИТАТОРАХ ЦЕЛИ НА КАЧЕСТВО ЭКСПЕРИМЕНТА

В статье приведены расчеты параметров электромагнитного поля, на основе которых получены зависимости, определяющие актуальность оснащения подвижных кареток радиолокационного имитатора цели устройствами слежения.

Для чего были проведены расчеты уровней плотности потока СВЧ-мощности для случаев со сферическим (идеализированным) и ортогональным радиолокационным имитатором цели с устройством слежения и без.

Построены графические зависимости уровней мощностей сигнала в фокусе радиолокационного имитатора цели, нормированные относительно идеализированного радиолокационного имитатора цели. В реальной безэховой камере проведены экспериментальные измерения уровней сигнала в фокусе радиолокационного имитатора цели с использованием устройств слежения и без, а также выполнено сравнение результатов измерений с расчетными значениями и сделаны выводы о применении устройств слежения в радиолокационном имитаторе цели при испытаниях радиолокационных систем наведения авиационных и корабельных управляемых средств поражения.

## ВВЕДЕНИЕ

Испытательные комплексы полунатурного моделирования (ИКПМ) являются важнейшей частью в отработке технически сложных бортовых систем управления (БСУ) авиационных и корабельных управляемых средств поражения (УСП), используемых радиолокационных систем пассивного и активного наведения (автопеленгации). На ИКПМ отрабатываются практически все варианты применения УСП, включая нереализуемые в полигонных условиях, что позволяет сократить количество сложных натурных испытаний.

Испытания на ИКПМ предусматривают контроль энергетических и точностных характеристик радиолокационных систем наведения, таких как чувствительность приемного тракта и точность пеленгации, угловая скорость и угол линии визирования. Для обеспечения достоверности эксперимента требуется максимально точное воссоздание фоноцелевой обстановки с параметрами электромагнитного поля (ЭМП), формируемого в эфирном пространстве безэховой радиозащищенной камеры (БЭК) [1]. Воспроизведение ЭМП с заданными параметрами осуществляется посредством радиолокационных имитаторов цели (РИЦ).

В настоящее время ИКПМ представляет универсальный инструмент, позволяющий обрабатывать радиолокационные системы в различных частотных диапазонах. В связи с этим на БЭК накладываются дополнительные требования, связанные с необходимостью формировать ЭМП с плоским фронтом волны на различных частотах, а это приводит к увеличению как минимум одного из габаритов камеры согласно:

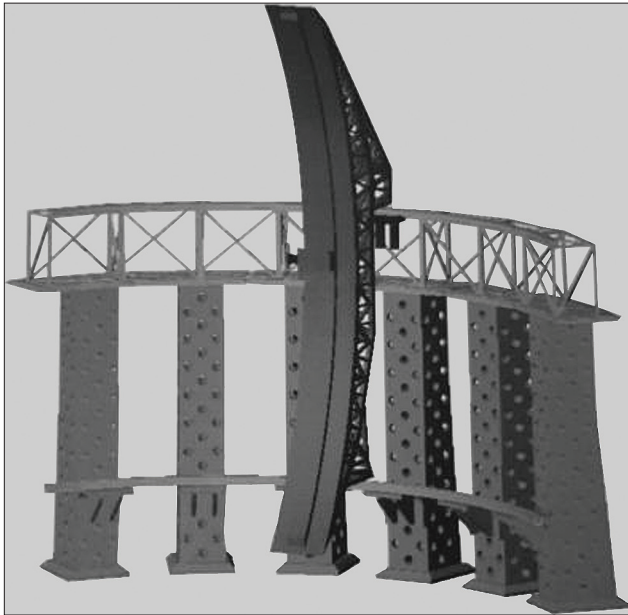
$$L = k \frac{2(D_1 + D_2)}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $k = 1-5$  — коэффициент, соответствующий плоскому фронту волны;  $D_1$  и  $D_2$  — поперечные размеры апертур приемной и передающей антенн;  $\lambda$  — длина волны.

Одним из перспективных направлений в эксплуатации ИКПМ является максимальное использование потенциала БЭК, для чего в последнее время РИЦ выполняют многопозиционным [2]. Это означает, что РИЦ делается подвижным, с возможностью фиксации в зависимости от (1) на различных расстояниях от испытываемой радиолокационной системы наведения (РЛСН). Такое решение предполагает значительное усложнение конструкции РИЦ, ввиду наличия на имитаторе опорно-подвижного основания с элементами швартовки к стенам БЭК [3]. Также из-за ортогонального исполнения рабочей базы становится актуальным вопрос оснащения подвижных кареток РИЦ устройствами слежения (УС) линии визирования для обеспечения постоянной ориентации антенны РИЦ в сторону РЛСН (сторону фокуса ориентации) при ненулевых углах кареток РИЦ с установленными на них антенными узлами.

Актуальность вопроса о необходимости снабжения кареток РИЦ устройствами слежения очень высока. Наличие УС на каретках РИЦ повышает стоимость создания современного РИЦ на 20–30%.

Настоящая статья посвящена определению необходимости реализации УС на подвижных каретках перспективных РИЦ.



▲ Рис. 1. Идеализированный РИЦ (внешний вид)

### ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЙ РИЦ

Плотность потока мощности (ППМ) в точке приема (в фокусе РИЦ) будет определяться по формуле [4]:

$$S = \frac{P_{\text{прд}} \cdot 10^{0,1G_{\text{прд}}} \cdot \theta_r(\varphi_r)^2 \cdot \theta_v(\varphi_v)^2}{4\pi R^2},$$

где  $P_{\text{прд}}$  — мощность передатчика;  $G_{\text{прд}}$  — коэффициент усиления антенны;  $\theta_r(\varphi_r)$  и  $\theta_v(\varphi_v)$  — нормированная диаграмма направленности антенны (ДНА) в горизонтальной и вертикальной плоскостях (будем использовать выражение  $(\sin x)/x$  для описания ДНА [5]);  $\varphi_v$  и  $\varphi_r$  — угол между направлением на исследуемую антенну и ее осью;  $R$  — расстояние от центра передающей антенны до центра приемной антенны.

На рис. 1 и 2 изображен внешний вид и схема идеализированного РИЦ.

Этот вариант назовем «идеальным», так как РИЦ будет перемещаться по окружности заданного радиуса, причем передающая антенна на РИЦ всегда будет направлена в сторону приемной антенны.

В данном варианте конструктивного исполнения РИЦ антенна направлена на РЛСН (в сторону фокуса РИЦ), а движение по заданной окружности подразумевает неизменность  $R$ , из чего следует, что ППМ в точке приема постоянна (при условии, что приемная антенна РЛСН также ориентируется в направлении антенны РИЦ или имеет круговую ДНА). Примем данную ППМ за  $S = 1$  отн. ед.

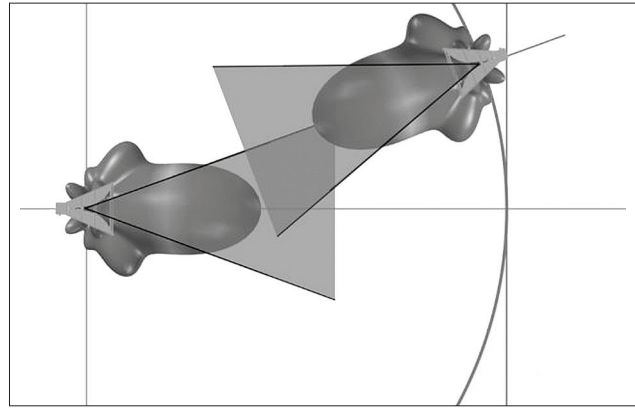
### ОРТОГОНАЛЬНЫЙ РИЦ С УСТРОЙСТВОМ СЛЕЖЕНИЯ

На рис. 3 изображен вариант РИЦ, когда рабочая база расположена перпендикулярно к оси РЛСН, при этом РИЦ перемещается по базе, а устройство слежения РИЦ ориентирует антенный узел в направлении РЛСН.

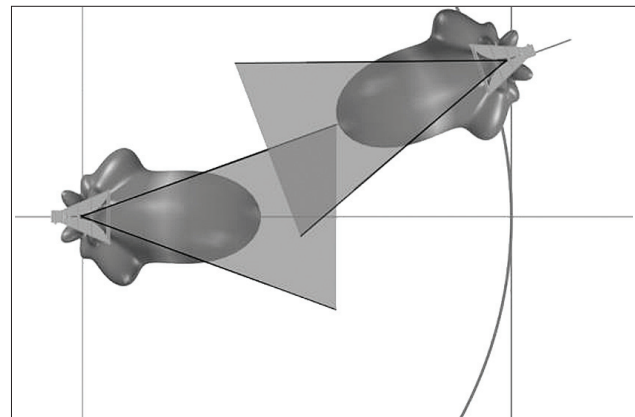
При этом расстояние  $R$  будет переменной величиной, а угол между линией визирования антенн и осью передающей антенны РИЦ будет равен  $0^\circ$ , а потому ППМ в данном случае будет рассчитываться по формуле:

$$S = \frac{P_{\text{прд}} \cdot 10^{0,1G_{\text{прд}}}}{4\pi(R + \Delta R)^2},$$

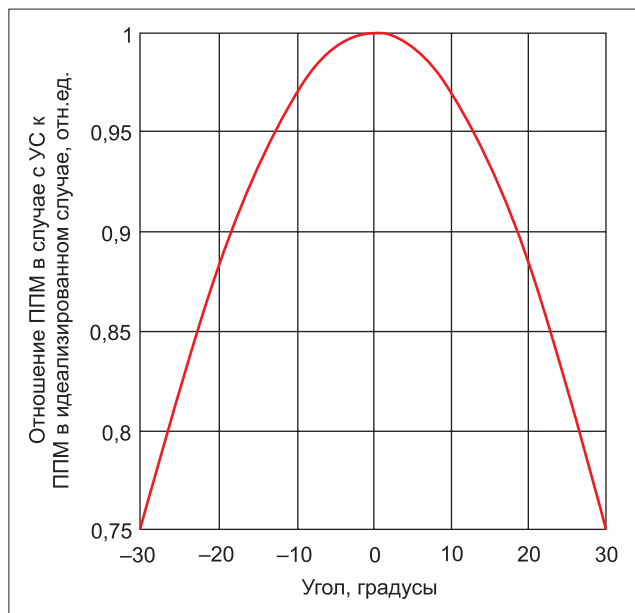
где  $\Delta R = \frac{R}{\cos \varphi} - R$ ;  $\varphi$  — угол визирования антенного узла РИЦ.



▲ Рис. 2. Идеализированный РИЦ (схема)



▲ Рис. 3. Ортогональный РИЦ с устройством слежения

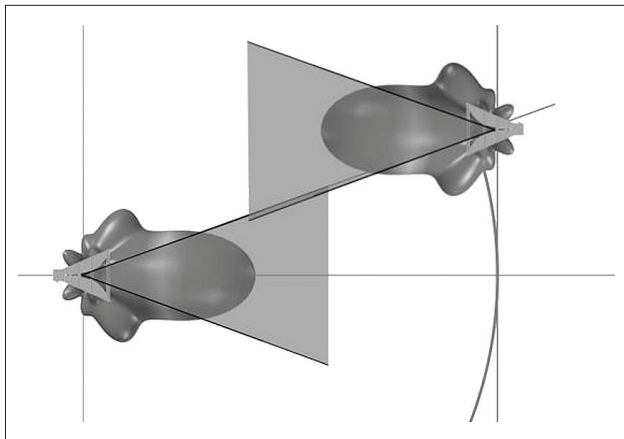


▲ Рис. 4. Отношение ППМ в случае с УС к ППМ в «идеальном» случае

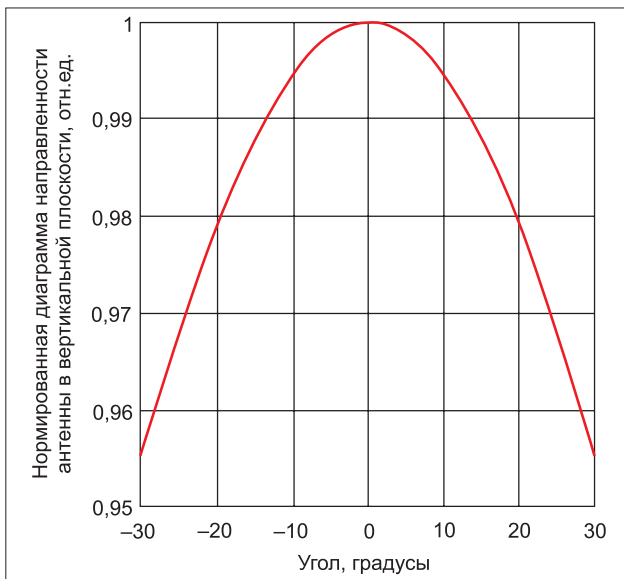
Тогда отношение ППМ в случае РИЦ с УС к ППМ в «идеальном» случае (рис. 4):

$$S_{\text{УС}} = S \frac{R^2}{\left(\frac{R}{\cos \varphi}\right)^2}.$$

Проанализировав рис. 4, можно видеть изменение мощности в зависимости от угла визирования (положения антенного узла РИЦ).



▲ Рис. 5. Ортогональный РИЦ без устройства слежения



▲ Рис. 6. Нормированная ДНА

**ОРТОГОНАЛЬНЫЙ РИЦ БЕЗ УСТРОЙСТВА СЛЕЖЕНИЯ**

На рис. 5 изображена схема РИЦ без УС.

При этом расстояние  $R$  и угол между линией визирования антенн и осью передающей антенны РИЦ будут изменяться от угла визирования, поэтому ППМ в таком случае будет рассчитываться по формуле:

$$S = \frac{P_{\text{прд}} \cdot 10^{0,1G_{\text{прд}}} \cdot \theta_{\text{в}}(\varphi_{\text{в}})^2}{4\pi(R + \Delta R)^2},$$

где  $\theta_{\text{в}}(\varphi_{\text{в}})$  (рис. 6) при измерении только в вертикальной плоскости будет равен:

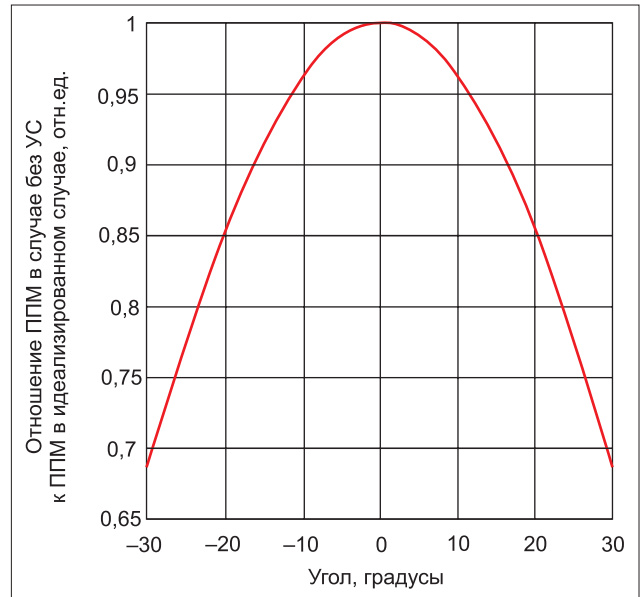
$$\theta_{\text{в}}(\varphi_{\text{в}}) = \frac{\sin \varphi_{\text{в}}}{\varphi_{\text{в}}}.$$

Тогда отношение ППМ в случае без УС к ППМ в «идеальном» случае примет вид (рис. 7):

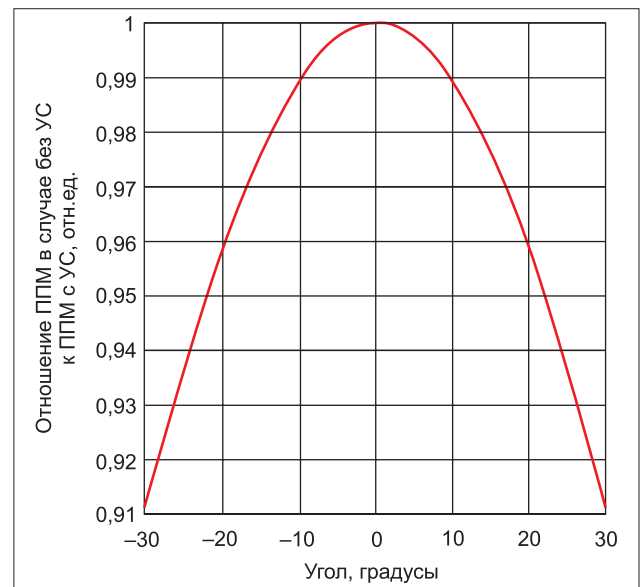
$$S_{\text{без УС}} = S_{\text{УС}} \cdot \theta_{\text{в}}(\varphi_{\text{в}})^2.$$

Тогда отношение ППМ в случае без УС к ППМ с УС примет вид (рис. 8):

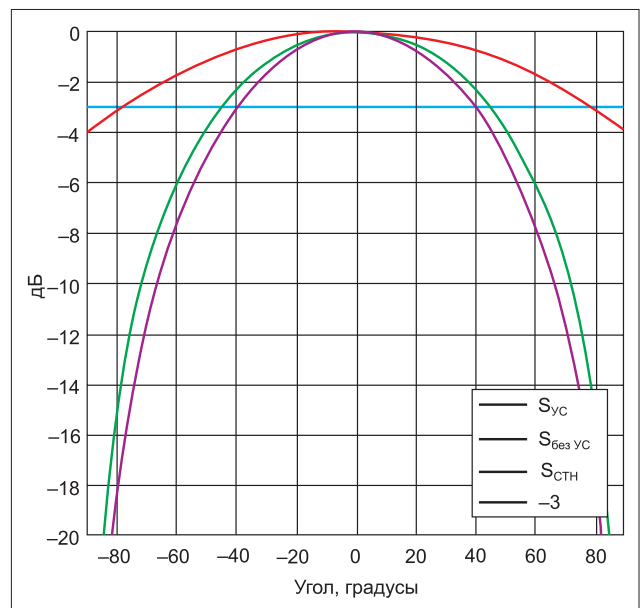
$$S_{\text{отн}} = \theta_{\text{в}}(\varphi_{\text{в}})^2.$$



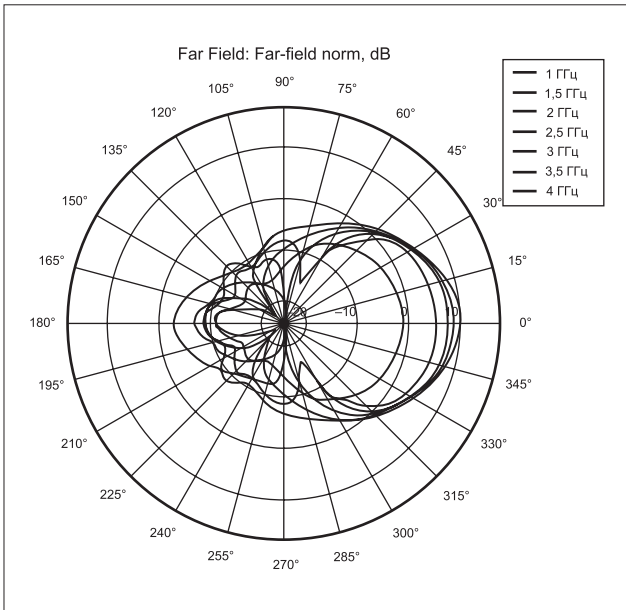
▲ Рис. 7. Отношение ППМ в случае без УС к ППМ в «идеальном» случае



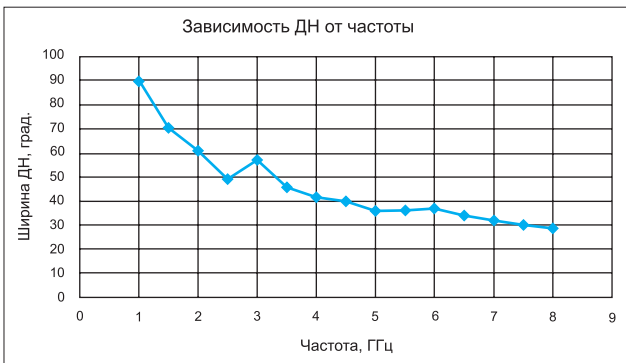
▲ Рис. 8. Отношение ППМ в случае без УС к ППМ с УС



▲ Рис. 9. Зависимость отношений ППМ для всех рассмотренных случаев



▲ Рис. 10. ДНА в полярных координатах при различных частотах



▲ Рис. 11. Зависимость ширины ДНА от частоты

Построим зависимость отношений ППМ для всех рассмотренных случаев в дБ (рис. 9). Можно сделать следующие выводы:

- сравнивая  $S_{УС}$  с  $S_{без\_УС}$  ( $S_{отн} = S_{без\_УС} - S_{УС}$ ), можно видеть, что в пределах рабочих углов РИЦ выигрыш, вызванный наличием УС, вдвое меньше, чем изменение величины ППМ за счет наличия ортогональности РИЦ;
- абсолютная величина изменения плотности потока мощности в фокусе РИЦ на максимальных углах визирования соизмерима с погрешностью измерения коэффициента усиления одной из антенн, что подтверждает актуальность исследования влияния УС;
- учитывая, что ДНА ограничена затуханием сигнала больше -3 дБ, следует предположить, что предельные углы визирования РИЦ без УС не должны превышать половины ширины ДНА [6];
- диапазон предельных углов визирования РИЦ без УС ограничен максимальной частотой антенны РИЦ.

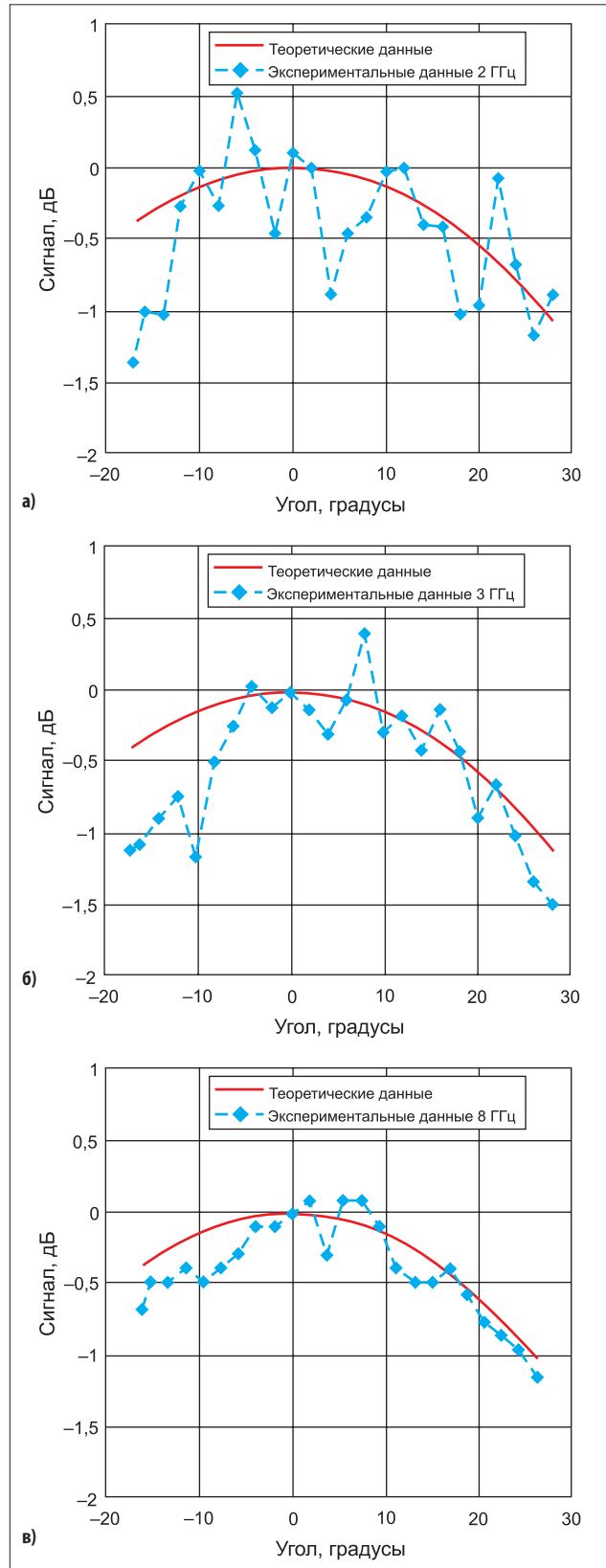
Для анализа предельных углов визирования РИЦ без УС в специализированном ПО было проведено моделирование ширины ДНА для различных частот широкополосной антенны, установленной на подвижной каретке РИЦ (рис. 10, 11).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для подтверждения теоретических расчетов был проведен ряд экспериментов в реальной БЭК.

Эксперименты выполнены на ортогональном РИЦ с УС и подвижной приемной антенной, установленной в фокусе РИЦ [7, 8].

На рис. 12 отображены приведенные значения мощностей, полученные при эксперименте в сравнении с вычисленными по формулам при различных частотах.



▲ Рис. 12. Сравнение экспериментальных данных с расчетными

Таблица. Математическое ожидание и СКО [9, 10] приведенной мощности измеренного сигнала, определенные при анализе полученных в процессе эксперимента данных

Параметр	Частота, ГГц		
	2	3	8
Математическое ожидание, дБ	-0,584	-0,531	-0,439
СКО, дБ	0,492	0,491	0,351

При анализе полученных в процессе эксперимента данных были определены математическое ожидание и СКО [9, 10] приведенной мощности измеренного сигнала (табл.), в результате чего подтвердилась сходимость аналитических зависимостей, описывающих ДНА с экспериментальными данными.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принимая во внимание порядок величин уровня ППМ в фокусе РИЦ в пределах рабочих углов визирования с использованием УС, можно сделать вывод, что основной вклад на уменьшение ППМ вносит изменение расстояния от излучающей антенны до фокуса, вызванное ортогональностью конструкции РИЦ. А величина дополнительного снижения ППМ за счет отсутствия УС соизмерима с погрешностью коэффициентов усиления антенн. Полученные результаты говорят о том, что при исследовании характеристик РЛСН с использованием в опытах антенн, установленных на РИЦ, и при работе в пределах ДНА допустимо отсутствие УС на подвижных каретках. Однако при проведении исследований на высоких частотах (свыше 4 ГГц), при которых ДНА РИЦ уже рабочего сектора РЛСН ( $\varphi > 40^\circ$ ), а также для обеспечения требуемого динамического диапазона изменения ППМ в фокусе РИЦ целесообразно использование УС.

Для снижения стоимости РИЦ за счет отсутствия УС возможно использование излучающих антенн с широкой ДНА на высоких частотах, но такие мероприятия приводят к повышенному уровню

излучаемой мощности и, как следствие, к излишним переотражениям от поверхностей БЭК, для исключения которых требуется применение РПМ с более высокими характеристиками поглощения, что в свою очередь соизмеримо по стоимости с установкой УС. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов А. Б., Кренёв А. Н., Селянская Е. А. Полунатурное моделирование радиотехнических систем. Ярославль, ЯрГУ, 2014.
2. Зиновьев В. Н., Солод А. Г., Васильев Н. А. Радиомимикатор целей и способ его использования. Патент РФ № 2349862 на изобретение.
3. Селезов И. Т., Кривонос Ю. Г., Яковлев В. В. Рассеяние волн локальными неоднородностями в сплошных средах. Киев, Наукова думка, 1985.
4. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006.
5. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации. Учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1983.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982.
7. Захарьев Л. Н., Леманский А. А., Турчин В. И., Цейтлин Н. М. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. М.: Радио и связь, 1985.
8. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. М.: Советское радио, 1972.
9. Бугров Я. С., Никольский С. М. Дифференциальное и интегральное исчисления. М.: Наука, 1988.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003.