

**МСЭ-R**  
Сектор радиосвязи МСЭ

**Отчет МСЭ-R SM.2354-0**  
(06/2015)

**Альтернативная процедура испытаний  
для измерения точности и устойчивости  
радиопеленгаторов с использованием  
блока моделирования**

**Серия SM**  
**Управление использованием спектра**

## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

## Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.)

Серия	Название
<b>VO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	Распространение радиоволн
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	Системы дистанционного зондирования
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	<b>Управление использованием спектра</b>

*Примечание.* – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2015 г.

© ITU 2015

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2354-0

**Альтернативная процедура испытаний для измерения точности и устойчивости радиопеленгаторов с использованием блока моделирования**

(2015)

## СОДЕРЖАНИЕ

*Стр.*

1	Введение.....	1
2	Измерительная установка.....	2
2.1	Блок моделирования угла прихода .....	2
2.2	Блок моделирования для чистой среды.....	3
2.3	Блок моделирования для многолучевой среды .....	3
2.4	Калибровка блока моделирования.....	4
3	Моделирование антенны .....	4
3.1	Моделирование путем анализа электромагнитных полей.....	5
3.2	Моделирование с использованием данных измерений .....	5
4	Процедура измерения .....	5
4.1	Чистая среда.....	5
4.2	Многолучевая среда .....	6
5	Дополнительные аспекты, касающиеся измерения РП на ВЧ.....	6
	Приложение 1 – Пример конфигурации блока моделирования угла прихода .....	7
	Приложение 2 – Сравнение результатов измерения, полученных при моделировании, с результатами реального измерения.....	9

**1 Введение**

В Рекомендациях МСЭ-R SM.2060-0 "Процедура испытаний для измерения точности радиопеленгатора" и МСЭ-R SM.2061-0 "Процедура испытаний для измерения устойчивости радиопеленгаторов к многолучевому распространению" определяются стандартные процедуры испытаний, предназначенные для использования производителями радиопеленгаторов (РП), которые позволяют пользователям сравнивать точность радиопеленгации, обеспечиваемую системами РП различных производителей.

Описываемый в настоящем Отчете блок моделирования предлагает альтернативный метод измерения при наличии трудностей в измерении точности РП с использованием безэховой камеры или в открытых местах проведения испытаний (ОМПИ). В частности, его целесообразно использовать для измерения точности РП в районах, где трудно обеспечить ОМПИ с электромагнитно чистой средой и/или получить разрешение на использование частот для проведения измерения в ОМПИ. Кроме того, он полезен при наличии проблемы с измерением в безэховой камере, связанной с

невозможностью обеспечить достаточное расстояние от системы РП при проведении испытания в диапазоне ВЧ.

Антенна РП состоит из нескольких элементов. Основная функция данного блока заключается в моделировании амплитуды и фазы выходных сигналов, передаваемых несколькими элементами антенны (общее название этих сигналов – "характеристика антенной решетки") при получении ими входного сигнала от внешнего источника. Характеристику антенной решетки РП можно анализировать с приемлемым уровнем точности, используя имеющиеся сегодня новейшие средства анализа электромагнитных полей.<sup>1</sup> Безусловно, также эффективно использовать результаты измерения реальной характеристики антенной решетки РП.

В Приложении 1 приведен пример конфигурации блока моделирования угла прихода, которая может использоваться в описанном ниже методе измерения. В Приложении 2 представлен ряд данных измерений, показывающих, что результаты измерения точности РП, полученные с использованием блока моделирования, сравнимы с результатами, полученными при реальном измерении.

## 2 Измерительная установка

### 2.1 Блок моделирования угла прихода

На рисунке 1 показана базовая схема блока моделирования угла прихода, который моделирует характеристику антенной решетки. С помощью этой схемы моделируются электрические выходные сигналы, передаваемые соответствующими элементами антенны (т.е. характеристика антенной решетки) при приеме антенной РП входного сигнала, поступающего с того или иного азимута. Данный блок моделирования угла прихода обладает почти теми же функциями, что и блок моделирования азимута угла прихода, описанный в Отчете МСЭ-R SM.2125, но он может учитывать также угол места.

И входной, и выходной сигналы этого блока моделирования угла прихода являются РЧ-сигналами. Данный блок моделирования учитывает в выходном сигнале различные условия. Применительно к частоте, на которой проводятся испытания, в выходном сигнале можно учесть не только разность фаз, вызванную расположением элементов антенны, и амплитуду, определяемую их направленностью, но и изменение амплитуды и фазы, вызванное взаимной связью между элементами, и даже влияние интерференции, обусловленной конструкцией антенны (например, интерференции от антенной мачты и т.д.).

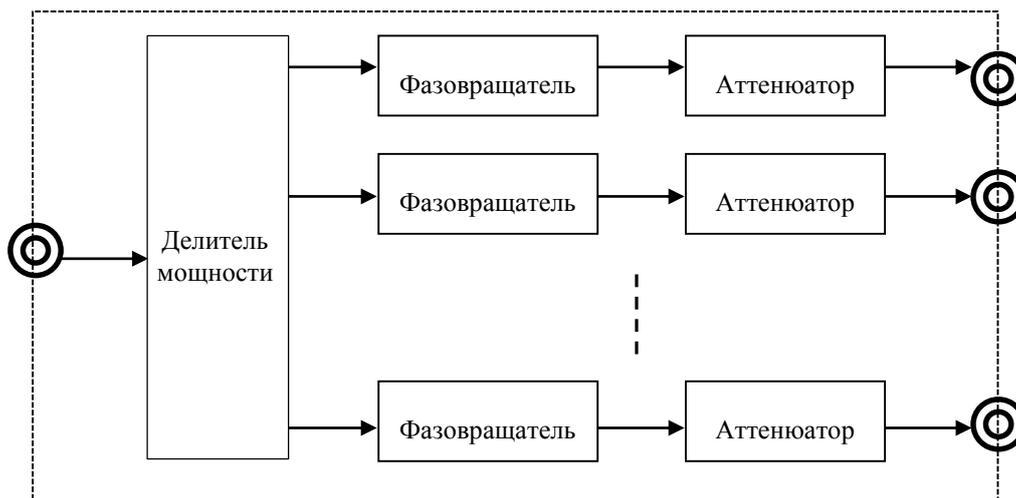
Меняя настройку фазовращателя и аттенюатора в соответствии с углом падения входного сигнала, можно моделировать выходной сигнал, передаваемый каждым элементом антенны.

---

<sup>1</sup> Примеры средств анализа электромагнитных полей включают некоммерческое программное обеспечение: "NEC-4", разработанное в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, и Калифорнийском университете, США; коммерческое программное обеспечение: "ANSYS HFSS", лицензируемое ANSYS, Inc., и "CST STUDIO SUITE", лицензируемое Computer Simulation Technology AG.

РИСУНОК 1

Базовая схема блока моделирования угла прихода

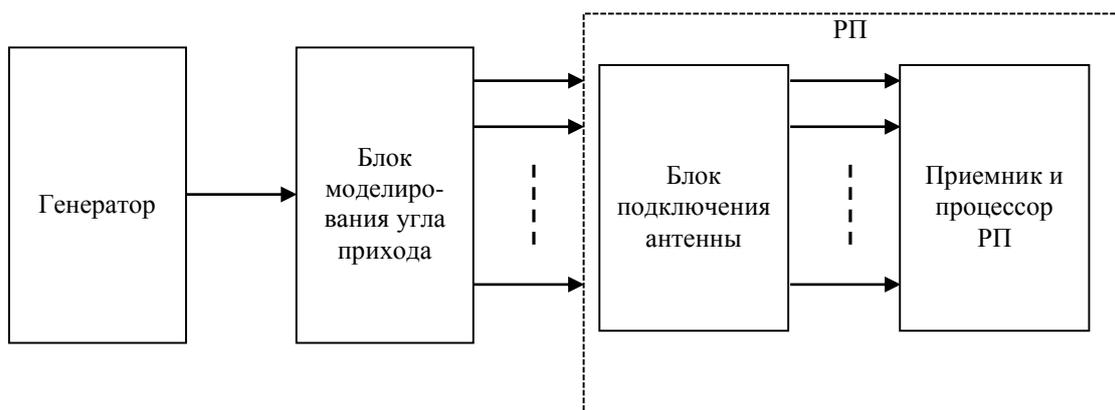


## 2.2 Блок моделирования для чистой среды

Конфигурация блока моделирования, предназначенная для моделирования одного входного сигнала, изображена на рисунке 2. В данной конфигурации моделируются условия испытаний, показанные на рисунке 1 Рекомендации МСЭ-R SM.2060. Сигнал вырабатывается с помощью генератора и подается на блок моделирования угла прихода, который моделирует выходной сигнал антенны РП. Выходной сигнал блока моделирования угла прихода подводится к блоку подключения антенны радиопеленгатора. Таким образом, испытание радиопеленгатора проводится для системы радиопеленгации без антенны.

РИСУНОК 2

Конфигурация блока моделирования для одного входного сигнала



## 2.3 Блок моделирования для многолучевой среды

На рисунке 3 изображена конфигурация блока моделирования для случая многолучевости, в котором сигнал, излучаемый одним источником, проходит по нескольким трассам. В данной конфигурации моделируются условия испытаний, показанные на рисунке 1 Рекомендации МСЭ-R SM.2061.

С помощью делителя мощности один сигнал, вырабатываемый генератором, делится на два сигнала, один из которых представляет основной сигнал, а другой – отраженный. Имеется возможность регулирования амплитуды и фазовой задержки каждого сигнала – основного и отраженного.

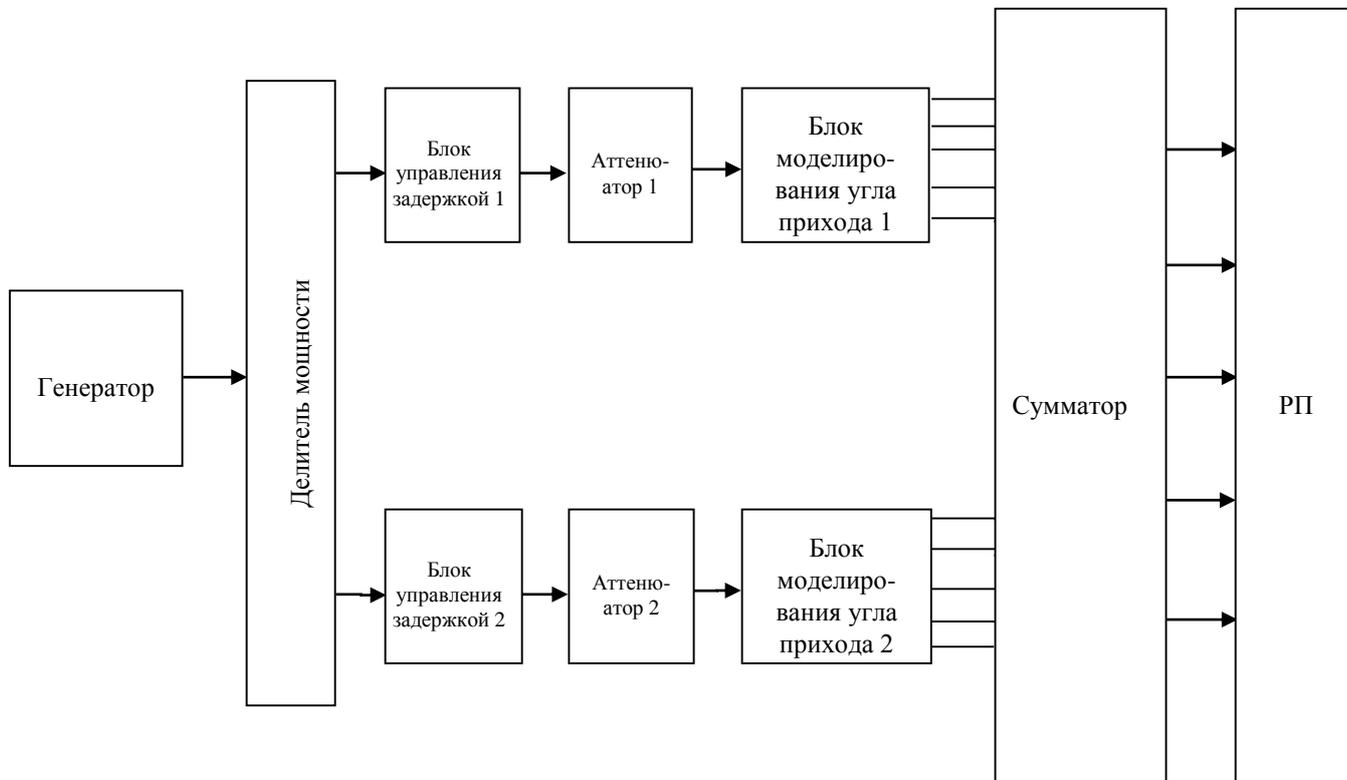
Линии передачи основного и отраженного сигналов подключаются к блокам моделирования угла прихода 1 и 2, соответственно, которые моделируют характеристику антенной решетки РП согласно соответствующим углам прихода основного и отраженного сигналов.

Для каждого элемента антенны выходные сигналы двух блоков моделирования угла прихода объединяются, образуя принимаемый сигнал, передаваемый каждым элементом антенны. Благодаря этому обеспечивается моделирование сигналов, принимаемых антенной РП в условиях многолучевого распространения.

Объединенный выходной сигнал подводится к блоку подключения антенны радиопеленгатора.

РИСУНОК 3

Конфигурация блока моделирования для многолучевого сигнала



#### 2.4 Калибровка блока моделирования

Блок моделирования следует калибровать либо регулярно, либо каждый раз перед использованием. Точность блока моделирования можно проверить, измерив его выходной сигнал с помощью серийно выпускаемого анализатора сети.

Для проведения измерения выберите два из нескольких выходных портов блока моделирования и подключите их к порту опорного сигнала и измерительному порту анализатора сети. Настройте блок моделирования и анализатор сети на частоту, на которой вы хотите провести испытание. Установите фазу и амплитуду двух выходных портов блока моделирования и измерьте разности фаз и амплитуд двух портов с помощью анализатора сети. Зафиксируйте разницу между измеренными данными и значениями, установленными на блоке моделирования, как калибровочное значение.

При выполнении моделирования на блоке моделирования устанавливается определенный набор амплитуд и фаз, соответствующих характеристике антенной решетки. Точного моделирования можно добиться корректировкой амплитуды и фазы с учетом полученного калибровочного значения. Калибровочное измерение может быть более точным, если блок моделирования имеет порт опорного сигнала.

### 3 Моделирование антенны

Характеристику антенной решетки РП можно получить с использованием любого метода моделирования, описанного ниже.

### 3.1 Моделирование путем анализа электромагнитных полей

Характеристику антенной решетки РП можно получить с использованием (программного) средства анализа электромагнитных полей. Прежде чем проводить анализ, задайте механическую форму антенны и полное сопротивление в выходной точке элементов антенны. Проведите анализ решения для поля в дальней зоне (решение для случая, когда источник излучения расположен в бесконечности) с помощью средства анализа электромагнитных полей, чтобы получить выходные сигналы, которые будут передаваться каждым элементом антенны при приеме антенной РП входного сигнала на заданной частоте, приходящего под заданным углом. Результат этого анализа отражает не только разность фаз, вызванную пространственным расположением элементов антенны и амплитудными составляющими, определяемыми направленностью каждого элемента, но взаимную связь между элементами, а также интерференцию, создаваемую антенной мачтой и другими частями конструкции антенны. Переведите выходные данные, полученные средством анализа электромагнитных полей, в значения фазы и амплитуды напряжения принимаемого сигнала, и зафиксируйте их. Повторите анализ для разных углов прихода. Значения фазы и амплитуды, соответствующие каждому элементу антенны, которые получены для разных азимутов, образуют характеристику антенной решетки РП для соответствующих азимутов прихода.

При проведении анализа электромагнитных полей можно задавать не только азимут прихода, но и угол места.

### 3.2 Моделирование с использованием данных измерений

Для тех частот, на которых можно провести измерения в безэховой камере или ОМПИ, проведите реальное измерение и зафиксируйте значения фазы и амплитуды выходного сигнала каждого элемента антенны. Эти данные могут быть использованы при моделировании в качестве характеристики антенной решетки. Для проведения реального измерения соберите в безэховой камере или ОМПИ измерительную установку, как показано на рисунке 1 Рекомендации МСЭРП. Для проведения реального измерения, расположите измерительную установку, как показано на рисунке 1 Рекомендации МСЭ-R SM.2060 "Процедура испытаний для измерения точности радиопеленгатора". Настройте записывающее устройство так, чтобы зафиксировать значения фазы и амплитуды многоканального выходного сигнала антенны РП.

Используйте передающие антенны (Tx) для передачи сигналов на частоте, на которой проводится испытание, и антенну РП (Rx) для приема сигналов. Регулируйте поворотный стол для вращения антенны с шагом азимута, подходящим для испытываемого РП. Для каждого шага азимута зафиксируйте значения фазы и амплитуды выходного сигнала приемной системы, соответствующие каждому элементу антенны.

Для каждого азимута будут получены значения фазы и амплитуды, соответствующие каждому элементу антенны. Эти значения образуют характеристику антенной решетки РП для соответствующих азимутов прихода.

## 4 Процедура измерения

### 4.1 Чистая среда

Проведите измерение с использованием измерительной установки, описанной на рисунке 2 в п. 2.2, и тех же параметров, которые указаны в таблице 1 Рекомендации МСЭ-R SM.2060. На блоке моделирования угла прихода установите фазу и амплитуду (или затухание), соответствующие частоте и азимуту, на которых проводятся испытания, взяв их из значений характеристики антенной решетки, полученных в пп. 3.1 или 3.2, выше. При этом фазу и амплитуду (или затухание) необходимо установить отдельно для каждой линии, которая соответствует каждому элементу антенны РП.

Вначале установите генератор в режим выработки сигнала на частоте 1. На блоке моделирования угла прихода следует установить фазу и амплитуду (или затухание), соответствующие частоте 1 и

заданному азимуту. Зафиксируйте значение выходного сигнала РП для этого азимута. Повторите измерение для всех заданных азимутов.

Далее, установите генератор в режим выработки сигнала на частоте 2. На блоке моделирования угла прихода установите соответствующие фазу и амплитуду (или затухание) и проведите измерение, как описано выше. Повторите измерение в интервале от частоты 3 до частоты 16.

#### 4.2 Многолучевая среда

Проведите измерение с использованием измерительной установки, описанной на рисунке 3 в п. 2.3, и тех же параметров, которые указаны в таблице 1 Рекомендации МСЭ-R SM.2061 "Процедура испытаний для измерения устойчивости радиопеленгаторов к многолучевому распространению". На блоке моделирования угла прихода 1 и блоке моделирования угла прихода 2 установите фазу и амплитуду (или затухание), соответствующие частоте и азимуту, на которых проводятся испытания, взяв их из значений характеристики антенной решетки, полученных в пп. 3.1 или 3.2, выше. При этом фазу и амплитуду (или затухание) необходимо установить отдельно для каждой линии, которая соответствует каждому элементу антенны РП.

На аттенуаторе 1 и аттенуаторе 2 установите значения затухания 0 дБ и 6 дБ, соответственно. На блоке управления задержкой 1 установите значение 0 градусов. Эти установочные значение не меняются в течение всего измерения.

Вначале установите генератор в режим выработки сигнала на частоте 1. На блоке моделирования угла прихода 1 следует установить фазу и амплитуду (или затухание), соответствующие частоте 1 и заданному истинному азимуту. На блоке моделирования угла прихода 2 следует установить фазу и амплитуду (или затухание), соответствующие частоте 1 и заданному азимуту с учетом разности углов прихода  $\Delta\theta$ . На блоке управления задержкой 2 поочередно установите три заданных фазы  $\Delta\phi$ . Зафиксируйте значение выходного сигнала РП для каждого азимута.

Далее, на блоке моделирования угла прихода 2 установите второе заданное значение  $\Delta\theta$  и зафиксируйте значение выходного сигнала для каждого азимута, переключаясь поочередно между тремя фазами  $\Delta\phi$ . Повторите измерение для третьего значения  $\Delta\theta$ .

Выполнением указанных выше шагов завершается измерение на частоте 1. Перейдите к частоте 2 и выше и повторите измерение, устанавливая частоту генератора в интервале от частоты 2 до частоты М, до тех пор пока не завершится измерение на всех заданных частотах.

#### 5 Дополнительные аспекты, касающиеся измерения РП на ВЧ

Можно также измерить точность РП для входных сигналов, приходящих под некоторым углом места. Как было отмечено выше, измерение точности РП на ВЧ в безэховой камере или ОМПИ сопряжено с некоторыми трудностями. Однако измерить входные сигналы, приходящие под некоторым углом места, еще труднее, потому что для этого требуется большое пространство не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлении.

Вместе с тем, с помощью анализа электромагнитных полей, описанного в п. 3.1, можно получить значения фазы и амплитуды выходного сигнала, создаваемого каждым элементом антенны при приеме антенной РП входного сигнала, приходящего под некоторым углом места. Точность РП на ВЧ при приеме входного сигнала с заданной частотой, приходящего под заданными азимутом и углом места, можно измерить с использованием данных, полученных из анализа электромагнитных полей для настройки блока моделирования.

## Приложение 1

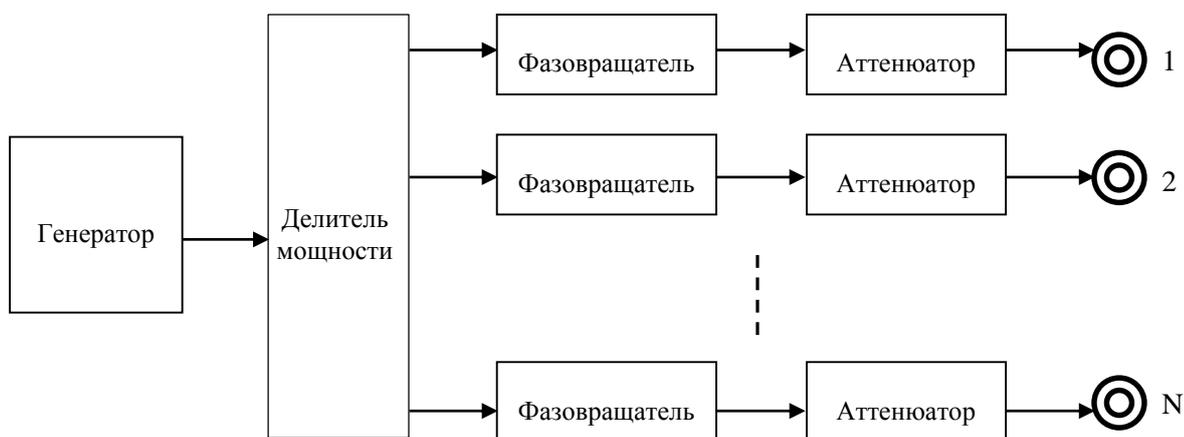
### Пример конфигурации блока моделирования угла прихода

Ниже приведен ряд примеров конфигурации блока моделирования.

- a) Делитель мощности, фазовращатели и аттенюаторы аналогового схемного модуля образуют конфигурацию, показанную ниже на рисунке 4, которая служит для моделирования выходных сигналов антенны РП, состоящей из  $N$  элементов.

РИСУНОК 4

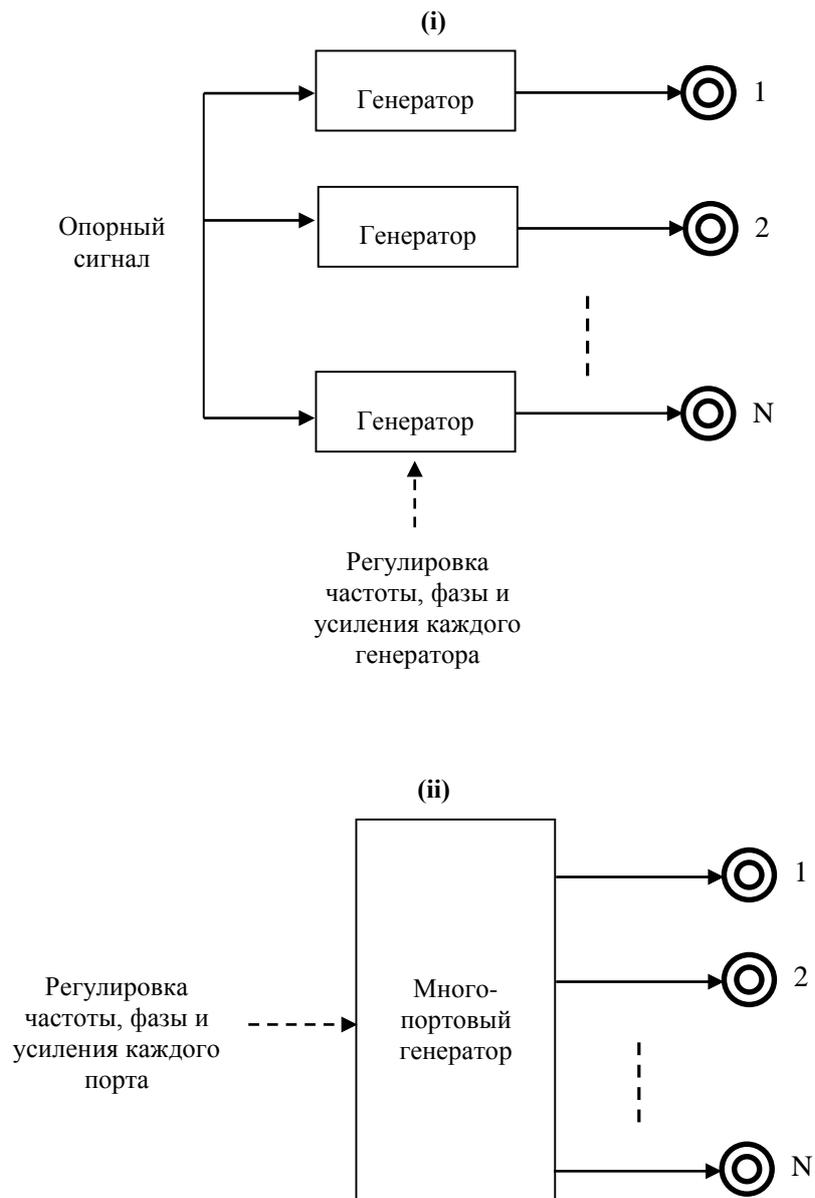
Конфигурация блока моделирования угла прихода (Пример 1)



- b) Конфигурация, показанная на рисунке 5, требует использования серийно выпускаемых генераторов сигналов с регулируемой фазой, которые обеспечивают возможность синхронной работы нескольких устройств. Обеспечьте количество устройств, равное количеству элементов, образующих антенну РП, и осуществите выработку непрерывных сигналов. В методе, показанном на рисунке 5 (i), установите заданные частоту, фазу и усиление (амплитуду) для каждого генератора сигнала, чтобы смоделировать характеристику антенной решетки. Вместе с тем, некоторые из новейших генераторов сигналов оснащены несколькими выходными портами. В случае использования такого многопортового генератора конфигурация значительно упрощается, как показано на рисунке 5 (ii).

РИСУНОК 5

## Конфигурация блока моделирования угла прихода (Пример 2)



## Приложение 2

### Сравнение результатов измерения, полученных при моделировании, с результатами реального измерения

#### 1 Моделирование электромагнитного поля антенны

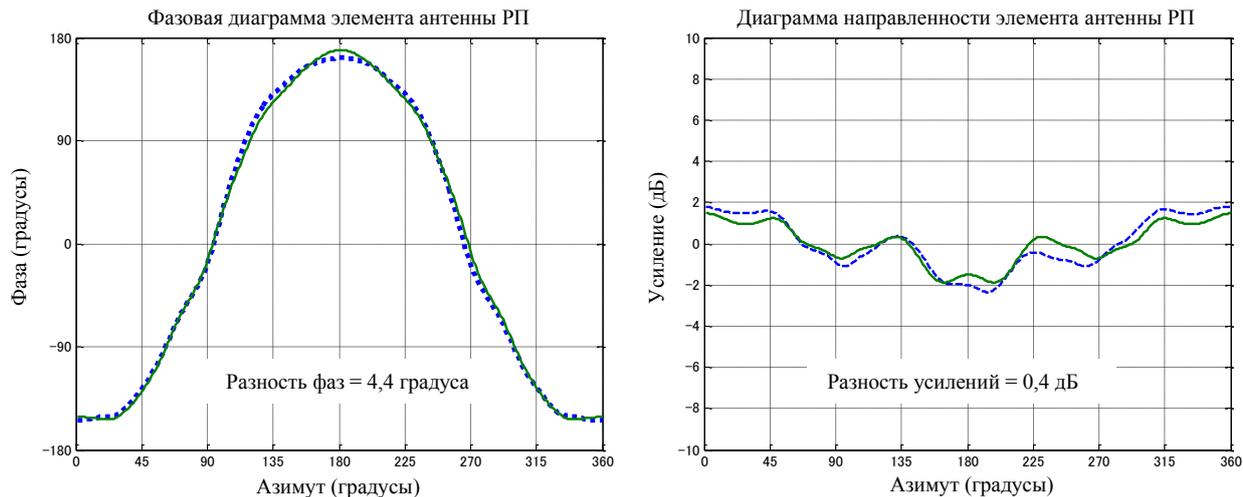
Характеристику антенны РП можно получить путем моделирования с использованием вычислительного устройства.

Для анализа электромагнитных полей используются такие методы, как метод моментов (МоМ) и метод конечных разностей в области времени (FDTD). Имеются различные типы программного обеспечения для анализа электромагнитных полей, в том числе "NEC-4", разработанное в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса и Калифорнийском университете, США, а также многие другие виды коммерческого программного обеспечения. Используя программное обеспечение на основе новейших методов анализа электромагнитных полей, можно получить такие же точные значения характеристики антенной решетки, что и в результате реальных измерений.

На рисунке 6 показаны примеры результатов анализа и результатов реального измерения фазы и усиления некоторого элемента пятиэлементной антенной решетки. Сплошная и пунктирная линии представляют, соответственно, результаты расчета и результаты реального измерения. Испытания проводились на частоте 402 МГц. Разница между результатами анализа и результатами реального измерения составила приблизительно 4,4 градуса для фазы и 0,4 дБ для амплитуды.

РИСУНОК 6

Сравнение результатов анализа электромагнитного поля (сплошная линия) с результатами реального измерения (пунктирная линия)



#### 2 Сравнение результатов испытания в ОМПИ с результатами испытания на основе блока моделирования

На рисунке 7 показаны результаты испытания РП с пятиэлементной антенной решеткой. Испытание проводилось на частоте 402 МГц. Условия проведения испытания в ОМПИ были аналогичны условиям, описанным на рисунке 1 Рекомендации МСЭ-R SM.2060.

Точность РП, измеренная в условиях ОМПИ, составила 0,31 градуса (среднеквадратическое значение), в то время как точность РП, полученная в результате анализа характеристики антенной решетки с помощью блока моделирования, составила 0,11 (среднеквадратическое значение). Результаты реального измерения включают погрешность определения азимута, вызванную условиями в месте проведения испытаний, установкой антенны РП и движением поворотного стола, а не погрешностью измерения самого радиопеленгатора. Принимая во внимание, что результаты испытания, полученные с использованием блока моделирования, свидетельствует о меньшей погрешности измерения азимута, чем результаты испытаний в ОМПИ, можно сделать вывод, что данный метод позволяет достаточно точно оценить точность РП.

РИСУНОК 7

**Сравнение точности РП, полученной при реальном измерении и при моделировании**