

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R М.1177-4
(04/2011)

**Методы измерения нежелательных
излучений радиолокационных систем**

Серия М

**Подвижная спутниковая служба, спутниковая
служба радиоопределения, любительская
спутниковая служба и относящиеся к ним
спутниковые службы**



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 1 МСЭ-R. 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 Рекомендаций МСЭ-R

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

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2011 г.

© ITU 2011

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.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R M.1177-4*

Методы измерения нежелательных излучений радиолокационных систем

(Вопрос МСЭ-R 202/5)

(1995-1997-2000-2003-2011)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены два метода измерения нежелательных излучений радаров. Данные методы следует использовать для измерения излучений в области побочных излучений и проверки мощности излучения относительно предельных уровней, определенных в Приложении 3 (Раздел II) к Регламенту радиосвязи, или для измерения уровня нежелательных излучений в области внеполосных излучений.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что фиксированные и подвижные радиолокационные станции службы радиоопределения широко применяются в полосах частот, соседних и гармонически связанных с полосами других служб;
- b) что станции других служб уязвимы для помех, создаваемых радиолокационными станциями, нежелательные излучения которых характеризуются высокими пиковыми уровнями мощности;
- c) что многие службы используют или планируют использовать системы цифровой модуляции, которые более чувствительны к помехам, создаваемым нежелательным излучением радаров;
- d) что при условиях, сформулированных в пп. а)–с) раздела *учитывая*, помехи станциям других служб могут быть вызваны нежелательными излучениями радиолокационных станций, характеризующимися высокими пиковыми уровнями мощности;
- e) что в Рекомендации МСЭ-R SM.329 определены максимальные значения нежелательных излучений радиопередатчиков в области побочных излучений;
- f) что в Рекомендации МСЭ-R SM.1541 определены общие предельные уровни нежелательных излучений в области внеполосных излучений,

рекомендует,

- 1 чтобы для количественной оценки уровней нежелательных излучений радиолокационных станций, работающих на частоте выше 400 МГц, использовались методы измерения, описанные в Приложении 1;
- 2 чтобы для количественной оценки уровней нежелательных излучений радиолокационных станций, работающих на частоте между 50 МГц и 400 МГц, использовались методы измерений, описанные в Приложениях 1 и 2 в зависимости от типа конструкции РЛС;
- 3 чтобы для количественной оценки уровней нежелательных излучений радиолокационных станций, работающих на частоте ниже 50 МГц, использовались методы измерения, описанные в Приложении 2.

* Настоящую Рекомендацию следует довести до сведения Международной морской организации (ИМО), Международной организации гражданской авиации (ИКАО), Международного комитета по морской радиосвязи (СIRM), Всемирной метеорологической организации (ВМО) и 1-й и 4-й Исследовательских комиссий по радиосвязи.

Приложение 1

Измерение нежелательных излучений радиолокационных систем, описанных в пп. 1 и 2 раздела *рекомендует*

1 Введение

Представляется описание двух методов измерения, известных как метод прямых и косвенных измерений.

Метод прямых измерений рекомендуется и применяется для измерения нежелательных излучений всех радаров, в том числе тех, конструкция которых не позволяет осуществлять измерения в промежуточных точках передатчиков радаров. К таким примерам относятся системы, в которых используются распределенные передающие решетки, встроенные (или включенные) в антенную структуру.

Метод косвенных измерений предусматривает отдельное измерение составляющих излучений радара и последующее суммирование результатов. Рекомендуется разбивать радар после вращающегося сочленения (Ro-Jo), измерять выходной спектр передатчика на выходном порте Ro-Jo, а затем комбинировать его с измеренными параметрами усиления антенны.

2 Эталонная полоса частот

Эталонная полоса частот радиолокационной системы B_{ref} , используемая при определении предельных уровней нежелательных излучений (Рекомендации МСЭ-R SM.329 и МСЭ-R SM.1541, а также Приложение 3 к Регламенту радиосвязи), должна рассчитываться для каждой конкретной РЛС. Таким образом, для четырех основных типов импульсной модуляции, используемой в РЛС для радионавигации, радиолокации, захвата цели на автоматическое сопровождение, слежения и других функций радиоопределения, ширина эталонной полосы определяется по следующим формулам:

- в случае радаров на фиксированной частоте без импульсного кодирования – единица, деленная на длительность импульса радара (например, если длительность импульса РЛС равна 1 мкс, то ширина эталонной полосы составит $1/1 \text{ мкс} = 1 \text{ МГц}$);
- в случае радаров на фиксированной частоте с фазово-импульсным кодированием – единица, деленная на длительность фазокодированного чипа (например, если длительность фазокодированного чипа равна 2 мкс, то ширина эталонной полосы составит $1/2 \text{ мкс} = 500 \text{ кГц}$);
- в случае радаров с частотной модуляцией (ЧМ) или с линейной частотной модуляцией – корень квадратный из величины, полученной путем деления ширины полосы пропускания РЛС в МГц на длительность импульса в мкс (например, если ЧМ охватывает полосу от 1250 до 1280 МГц, т. е. 30 МГц, во время действия импульса длительностью 10 мкс, то ширина эталонной полосы составит $(30 \text{ МГц}/10 \text{ мкс})^{1/2} = 1,73 \text{ МГц}$);
- в случае радаров, работающих с сигналами различной формы, ширина эталонной полосы частот определяется эмпирически путем наблюдения за излучением радара. Наблюдение выполняется следующим образом: приемник измерительной системы настраивается на одну из основных частот радара или на центральную частоту полосы диапазона линейной частотной модуляции радара. Для полосы частот измерительной системы выбирается максимально возможная ширина и регистрируется уровень мощности сигнала, получаемого от радара в данной полосе частот. Затем полоса частот измерительной системы постепенно сужается, и уровни мощности принимаемых сигналов регистрируются как функция этой ширины полосы. Результатом являются график или таблица, отражающие зависимость измеренной мощности от ширины полосы измерительной системы. Необходимой шириной полосы является самая узкая полоса, в которой наблюдается еще полный уровень мощности, а эталонная ширина полосы может быть рассчитана по известной импульсной характеристике приемника измерительной системы с учетом коэффициента полосы частот измерений (МБР), как описано ниже. Если снижение уровня мощности наблюдается сразу же, должна использоваться самая широкая из возможных полос частот.

Во всех случаях, если ширина полосы частот превышает 1 МГц, то следует использовать эталонную полосу частот B_{ref} шириной 1 МГц.

3 Полоса частот измерительной системы и параметры детектора

Полоса частот измерений B_m определяется как полоса частот импульсов приемника, а ее ширина превышает ширину полосы ПЧ B_{if} (иногда называемой полосой частот по разрешению анализаторов спектра). Ширина полосы частот измерений B_m может быть определена с помощью следующего уравнения:

$$B_m = B_{if} \times MBR.$$

Для используемого приемника измерительной системы должен быть определен MBR. Для используемого, как правило, в приемниках серийных анализаторов спектра гауссовского фильтра с полосой ПЧ на уровне -3 дБ коэффициент MBR равен примерно $3/2$ (в некоторых устройствах полоса ПЧ определяется на уровне -6 дБ).

Для получения одной из следующих рекомендуемых полос частот измерительной системы должен быть выбран приемник с соответствующей полосой ПЧ:

Ширина полосы частот измерений B_m^1 $\leq (1/T)$ в случае радаров на фиксированной частоте без импульсного кодирования, где T – длительность импульса (например, при длительности импульсов радара, равной 1 мкс, полоса частот измерительной системы должна быть $\leq 1/(1 \text{ мкс}) = 1 \text{ МГц}$).

$\leq (1/t)$ в случае радаров на фиксированной частоте с фазово-импульсным кодированием, где t – длительность импульсного чипа (например, если радар передает импульсы длительностью 26 мкс, каждый из которых состоит из 13 фазокодированных чипов длительностью 2 мкс, полоса частот измерений должна быть $\leq 1/(2 \text{ мкс}) = 500 \text{ кГц}$).

$\leq (B_c/T)^{1/2}$ в случае радаров с качанием частоты (ЧМ или линейная ЧМ), где B_c – диапазон качания частоты на каждом импульсе, а T – длительность импульса (например, если качание частоты радара осуществляется в диапазоне 1250–1280 МГц (ширина спектра равна 30 МГц), а длительность импульса составляет 10 мкс, полоса частот измерительной системы должна быть $\leq ((30 \text{ МГц})/(10 \text{ мкс}))^{1/2} = \sqrt{3} \text{ МГц} \approx 1,73 \text{ МГц}$. В соответствии с примечанием¹ в этом примере должна использоваться полоса частот измерительной системы, ширина которой близка, но не превосходит 1 МГц.

\leq результата измерений, выполненных следующим образом: в случае радаров, работающих с сигналами различной формы, ширина полосы частот измерительной системы определяется эмпирически путем наблюдения за излучением радара. Наблюдение производится следующим образом: приемник измерительной системы настраивается на одну из основных частот радара или на центральную частоту полосы диапазона линейной частотной модуляции радара. Для полосы частот измерительной системы выбирается максимально возможная ширина и регистрируется уровень мощности сигнала, получаемого от радара в данной полосе частот. Затем полоса частот измерительной системы постепенно сужается, и уровни мощности принимаемых сигналов регистрируются как функция этой ширины полосы частот измерительной системы. Результатом является график или таблица, отражающие зависимость измеренной мощности от ширины полосы измерительной системы. Подходящей полосой частот является полоса, при выборе которой впервые наблюдается снижение полного уровня мощности. Если снижение уровня мощности наблюдается сразу же, должна использоваться самая широкая из возможных полос частот.

¹ Во всех случаях, когда ширина полосы частот измерительной системы, полученная по приведенным выше правилам, превышает 1 МГц, следует провести коррекцию, описанную в п. 3.2.

Ширина полосы частот видеосигналов \geq ширины полоса частот измерительной системы.

Детектор положительный пик.

3.1 Измерения в области внеполосных излучений

В области внеполосных излучений описанные в Рекомендациях МСЭ-R SM.1541 предельные уровни задаются в дБпм. Такими предельными уровнями являются измеренная относительная мощность и полоса ПЧ, в результате чего должна использоваться полоса частот измерительной системы, ширина которой меньше ширины эталонной полосы частот. Даже если ширина полосы частот измерений меньше ширины эталонной полосы частот, в проведении коррекции нет необходимости, поскольку и пиковое значение спектра, и точки данных внутри области внеполосных излучений измеряются в одной полосе измерений B_m .

В целом измерения следует выполнять в полосе частот, ширина которой близка, но все же меньше ширины заданной эталонной полосы частот. Такой подход минимизирует время измерений, но также приводит к некоторому расширению измеренного спектра. Таким образом, в предельных случаях, когда может быть важным измерение действительно близких по форме спектров, рекомендуется в области близких спектров в пределах области внеполосных излучений провести измерения заново с использованием максимальной полосы частот, ширина которой в зависимости от случая составляет $0,2/T$ или $0,2/t$.

3.2 Измерения в области побочных излучений

3.2.1 Коррекция измерений в области побочных излучений

Если полоса частот измерений B_m отличается от эталонной полосы частот B_{ref} , для выражения результатов в эталонной полосе частот к измерениям, полученным в области побочных излучений, должен быть применен коэффициент коррекции. Коэффициент коррекции применяется следующим образом:

Уровень побочных излучений B_{ref} = Уровень побочных излучений (измеренный в B_m) + $10 \times \log(B_{ref}/B_m)$.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Исключением для обязательного использования данного коэффициента коррекции являются ситуации, в которых известно, что побочные излучения не являются шумоподобными, что значение коэффициента можно выбрать в диапазоне от 10 до $20 \log(B_{ref}/B_m)$, уточнив его по измерениям в нескольких полосах частот. В любом случае наиболее точный результат будет получен при использовании полосы частот измерений (B_m), равной эталонной полосе частот. Для радаров, работающих на частотах выше 1 ГГц, ширина эталонной полосы частот (B_{ref}) равна 1 МГц.

3.2.2 Коррекция данных измерений к пиковой мощности огибающей

В области побочных излучений предельные уровни, указанные в Приложении 3 к Регламенту радиосвязи, определяются в эталонной полосе частот по отношению к пиковой мощности огибающей (PEP). Данные, зарегистрированные в области побочных излучений в дБпм, должны указываться относительно пиковой мощности огибающей (а не пикового значения спектра, регистрируемого в дБпм).

Пиковая мощность огибающей аппроксимируется с помощью следующей корректирующей формулы:

Для незатухающих сигналов и фазокодированных импульсов:

$$PEP = P_{meas} + 20 \times \log(B_{pep}/B_m) \quad \text{при } B_{pep} > B_m.$$

Для импульсных радаров с качанием частоты (с частотной или линейной частотной модуляцией):

$$PEP = P_{meas} + 10 \times \log(B_c/(B_m^2 \times T)) \quad \text{для } (B_m^2 \times T)/B_c < 1,$$

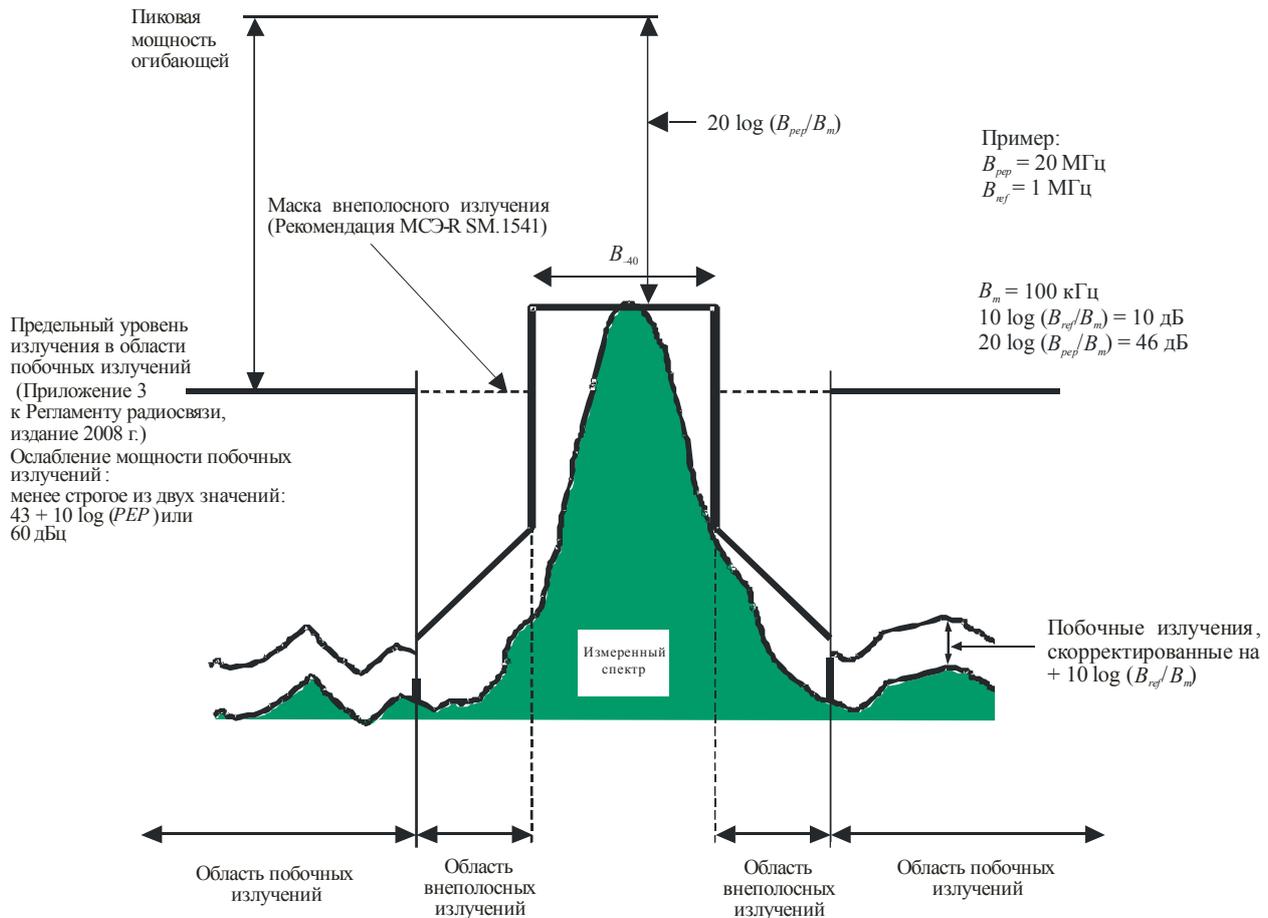
где:

- P_{EP} : пиковая мощность огибающей;
- P_{meas} : пиковая мощность спектра (B_m);
- B_{rep} : полоса частот, вычисленная по следующим правилам:
- в случае радаров на фиксированной частоте без импульсного кодирования – единица, деленную на длительность импульса радара (например, если длительность импульса РЛС равна 1 мкс, то ширина полосы частот B_{rep} равна $1/1 \text{ мкс} = 1 \text{ МГц}$);
 - в случае радаров на фиксированной частоте с фазово-импульсным кодированием: единица, деленная на длительность фазокодированного чипа (например, если длительность фазокодированного чипа равна 2 мкс, то B_{rep} составит $1/2 \text{ мкс} = 500 \text{ кГц}$);
 - в случае радаров с ЧМ или с линейной частотной модуляцией – корень квадратный из величины, полученной путем деления ширины полосы частот чипа в МГц на длительность импульса в мкс (например, если ЧМ охватывает полосу от 1250 до 1280 МГц, т. е. 30 МГц, во время действия импульса длительностью 10 мкс, то B_{rep} составит $(30 \text{ МГц}/10 \text{ мкс})^{1/2} = 1,73 \text{ МГц}$);
 - в случае радаров, работающих с сигналами различной формы, B_{rep} эмпирически путем наблюдения за излучением радара. Наблюдение выполняется следующим образом: приемник измерительной системы настраивается на одну из основных частот радара или на центральную частоту полосы диапазона линейной частотной модуляции радара. Для полосы частот измерительной системы выбирается максимально возможная ширина и регистрируется уровень мощности сигнала, получаемого от радара в данной полосе частот. Затем полоса частот измерительной системы постепенно сужается, и уровни мощности принимаемых сигналов регистрируются вместе с шириной полосы частот измерительной системы. Результатом являются график или таблица, отражающие зависимость измеренной мощности от ширины полосы частот измерительной системы. Необходимой полосой частот является самая узкая полоса, в которой наблюдается еще полный уровень мощности, а ширина полосы частот B_{rep} может быть рассчитана по известной импульсной характеристике приемника измерительной системы с учетом описанного ниже критерия. Если снижение уровня мощности наблюдается сразу же, должна использоваться самая широкая из возможных полос частот. Коррекция, описанная в п. 3.2, иллюстрируется графически на рисунке 1.

Как видно по рисунку 1, маска внеполосных излучений и измеренный спектр были приведены к эквивалентному уровню РЕР с использованием коэффициента $20 \log(B_{rep}/B_m)$. На рисунке показано, что измеренное побочное излучение сдвинуто вверх на величину, равную коэффициенту коррекции, описанному в п. 3.2.1 (и принятому здесь равным $10 \log(B_{ref}/B_m)$). В данном примере полоса частот измерений, равная 100 кГц, выбрана только для иллюстративных целей, даже при том, что для этого случая рекомендуется полоса частот, близкая к 1 МГц. Кроме того, для иллюстративных целей маска показана со сдвигом по частоте, что допускается Рекомендацией МСЭ-R SM.1541.

РИСУНОК 1

Графическая иллюстрация коррекции, описанной в п. 3.2



М.1177-01

4 Измерения в случае радаров, работающих с различными импульсами или режимами

В случае радаров, работающих с импульсными сигналами различной формы, полосу частот, определяемую на уровне B_{-40} дБ, следует рассчитывать для каждого типа импульсов, а затем самая широкая из них должна использоваться для установления формы маски излучений (см. Приложение 8 к Рекомендации МСЭ-R SM.1541).

В случае радаров, работающих с различными настройками ширины импульсов, которые могут выбираться индивидуально, должна использоваться настройка, при которой полоса частот, вычисленная на уровне B_{-40} дБ, имеет максимальную ширину (см. Приложение 8 к Рекомендации МСЭ-R SM.1541). Необходимо выполнить измерение излучений только при импульсах с выбранной длительностью.

Для радаров, в которых используется сканирование луча по углу места, измерения обычно необходимо выполнять только в азимутальной плоскости.

5 Динамический диапазон измерительной системы

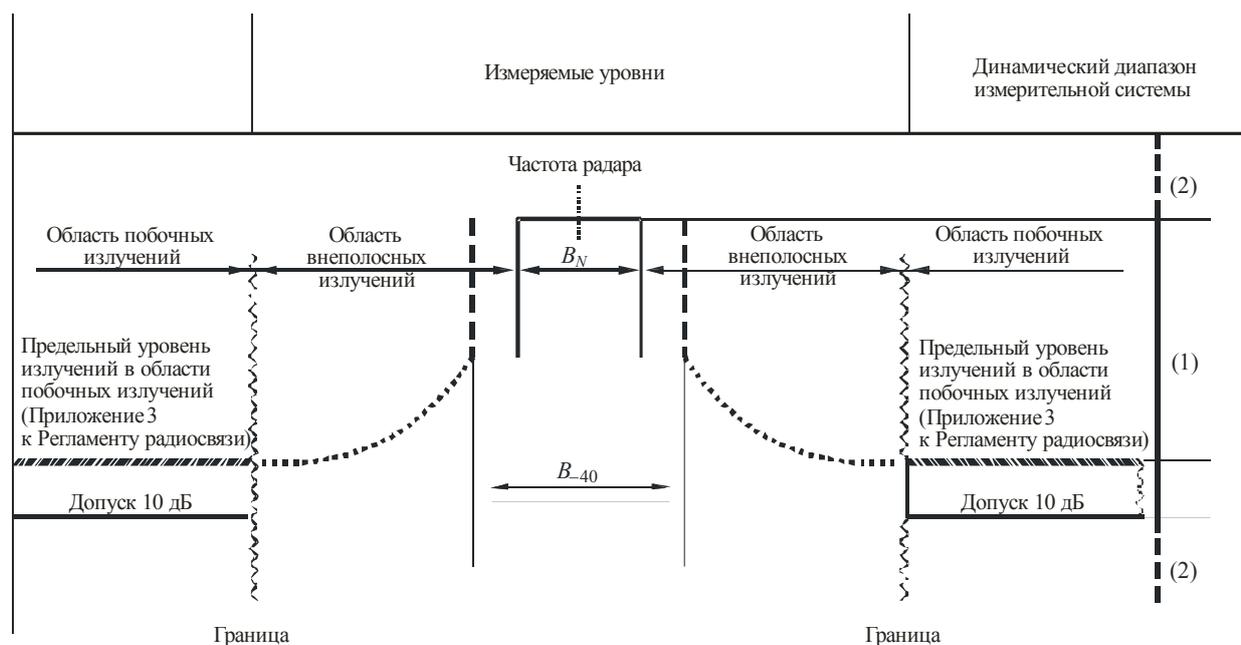
Измерительная система должна быть способна измерять уровни нежелательных излучений по правилам, указанным в Приложении 3 к Регламенту радиосвязи. Для получения полной картины спектра, особенно в области побочных излучений, рекомендуется, чтобы система могла измерять уровни излучения на 10 дБ ниже уровней, указанных в Приложении 3 к Регламенту радиосвязи.

Для достижения высокого уровня достоверности результатов динамический диапазон измерений должен быть значительно шире необходимого диапазона измерений (предельный диапазон (2) на рисунке 2).

Связь между необходимым диапазоном измерений и рекомендуемым динамическим диапазоном измерительной системы отражена на рисунке 2.

РИСУНОК 2

Связь между необходимым диапазоном измерений и рекомендуемым динамическим диапазоном измерительной системы



- (1): Рекомендуемый диапазон измерений
 (2): Предельный диапазон

М.1177-02

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Следует отметить, что в Рекомендации МСЭ-R SM.329 при ограничениях категории В в некоторых случаях рекомендуется выбирать более жесткие предельные уровни по сравнению с предельными уровнями, указанными в Приложении 3 к Регламенту радиосвязи. Это примечание следует принимать во внимание при оценке необходимого диапазона измерений и рекомендуемого динамического диапазона измерительной системы.

6 Методы прямых измерений

Для измерения нежелательных (внеполосных и побочных) излучений РЛС могут применяться два метода прямых измерений. В первом методе используется ручное управление, во втором – автоматическое. Оба метода использовались для измерения параметров излучения радиолокационных систем, работающих на частотах до 24 ГГц, имеющих передатчики с выходной мощностью до нескольких мегаватт и уровни э.и.и.м. в гигаваттном диапазоне. С учетом аспекта безопасности эти методы могут также применяться в безэховых камерах.

6.1 Условия проведения измерений

Что касается расстояния измерений, то измерения можно производить либо в ближнем, либо в дальнем поле. Изменение пикового значения полученного сигнала не должно превышать 3 дБ при использовании поглотителя, когда приемная антенна перемещается по горизонтали или вертикали на расстояние $\lambda D/2H$ от точки, в которой принят максимальный сигнал (H : высота точки передачи, D : расстояние измерения, λ : длина волны передатчика).

Что касается точки измерений, предпочтительно помещать передающую и принимающую антенны довольно высоко, например на мачте. Отметим, что высота должна определяться с учетом ширины луча антенн радара и измерительной системы в вертикальной плоскости, а между антеннами не должно присутствовать каких-либо отражающих объектов.

6.2 Измерительная аппаратура и программное обеспечение

Блок-схема измерительной системы, необходимой для реализации двух методов прямых измерений, приведена на рисунке 3 (ручной метод) и рисунке 4 (автоматический метод). Первым элементом системы, который следует рассмотреть, является приемная антенна. Приемная антенна должна иметь широкополосную частотную характеристику, по крайней мере не менее измеряемого диапазона частот. Обычно также желателен высокий коэффициент усиления (как, например, достигаемый с помощью параболического отражателя). Высокий коэффициент усиления позволяет использовать при измерениях широкий динамический диапазон, узкий луч антенны обеспечивает избирательность относительно других сигналов в данной области, узкий луч минимизирует проблемы, связанные с многолучевым распространением от радара, для которого производятся измерения, а собранные данные относительно спектра параболической антенны требуют минимальной последующей коррекции, как указывается в следующем разделе. Поляризация фидера антенны выбирается так, чтобы добиться максимальной реакции на сигнал радара. Если поляризация радара заранее не известна, целесообразно выбирать фидер с круговой поляризацией. Поляризация антенны может быть проверена путем вращения фидера (при использовании линейной поляризации) или путем замены фидера с правой круговой поляризацией фидером с левой круговой поляризацией (при использовании круговой поляризации).

Необходимо рассмотреть возможность коррекции переменного усиления антенны в зависимости от частоты. Уровни усиления антенны обычно определяются относительно уровней усиления теоретически идеальной изотропной антенны (дБи). Эффективная апертура изотропной антенны уменьшается как функция $20 \log(f)$, где f – измеряемая частота. Это означает, что, если антенна измерительной системы имеет постоянную эффективную апертуру (т.е. имеет изотропный коэффициент усиления, возрастающий как $20 \log(f)$), проведение какой-либо коррекции переменного усиления антенны не требуется. Это требование выполняется в случае теоретически идеальной антенны с параболическим отражателем и является одной из причин, по которым подобная антенна предпочтительна для измерения спектра широкополосного радара.

И наоборот, если усиление антенны измерительной системы меняется, отклоняясь от функции $20 \log(f)$ (включая не совсем идеальную параболическую антенну), полученные результаты измерений должны быть скорректированы в соответствии с величиной девиации.

Следует также рассмотреть параметры кабеля, соединяющего антенну измерительной системы с измерительной системой. Антенна соединена с РЧ входным каскадом измерительной системы с помощью РЧ кабеля с низкими потерями, причем длина кабеля меняется в зависимости от геометрии измерительной системы на каждом месте расположения радара. Так как принимаемый сигнал радара ослабляется вследствие потерь на этом участке линии, желательно, чтобы она была как можно короче и характеризовалась минимально возможными потерями.

РИСУНОК 3

**Блок-схема системы измерения нежелательных излучений радаров
с помощью метода прямых измерений с ручным управлением**

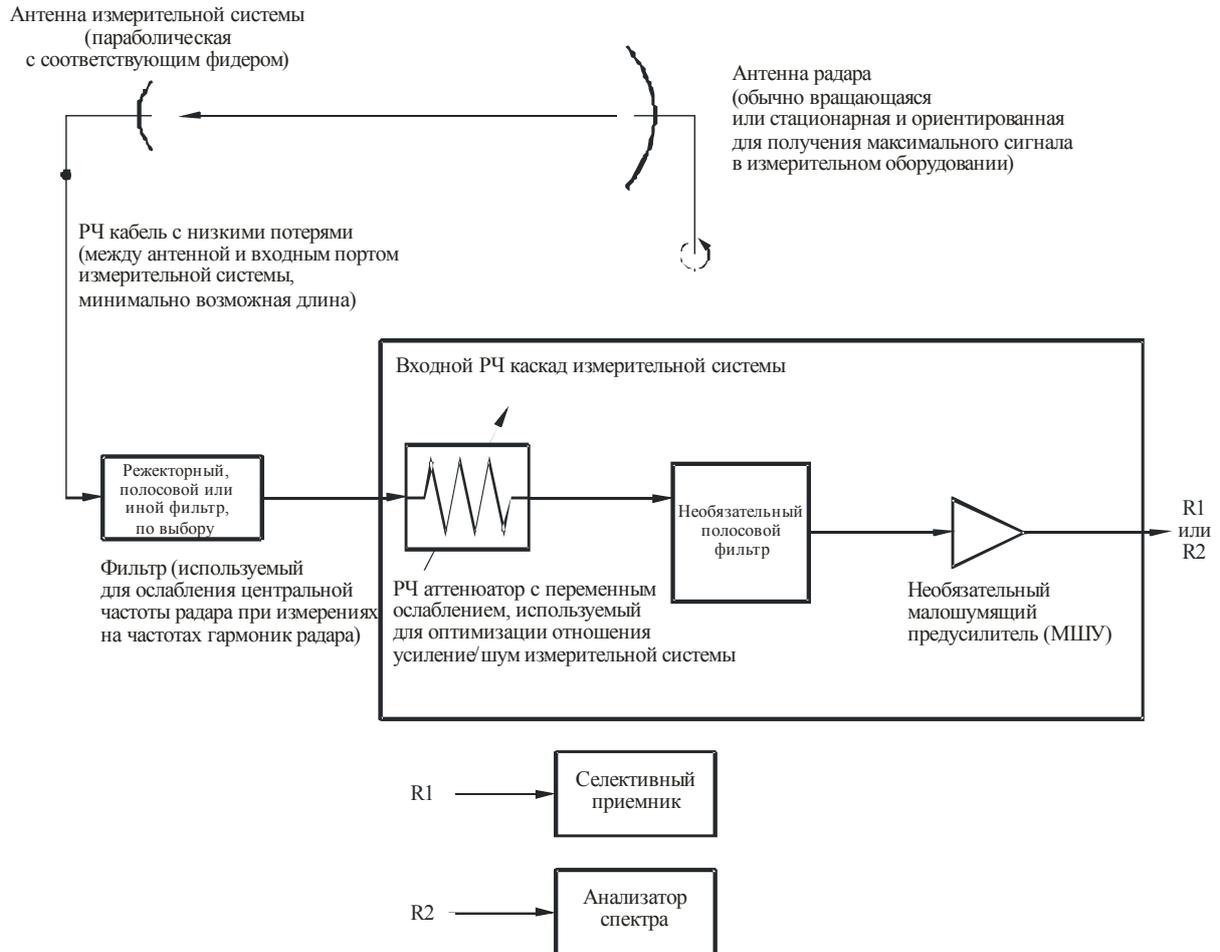
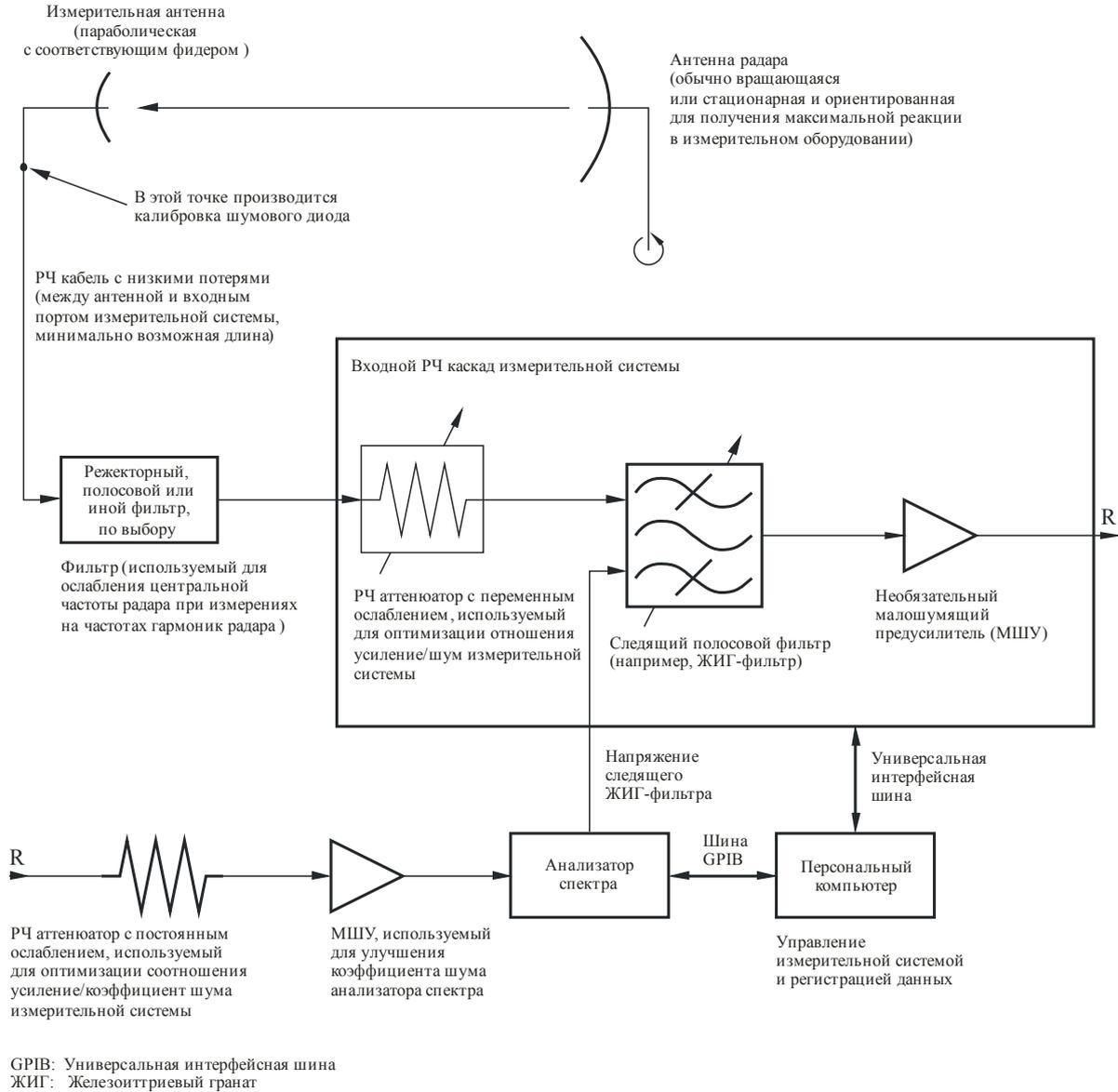


РИСУНОК 4

**Блок-схема системы измерения нежелательных излучений радаров
с помощью метода прямых измерений с автоматическим управлением**



М.1177-04

РЧ входной каскад является одной из важнейших частей измерительной системы. Он выполняет три важные функции. Во-первых, он управляет динамическим диапазоном измерительной системы и расширяет его, используя переменное затухание на радиочастотах. Во-вторых, он осуществляет полосовую фильтрацию (предварительную селекцию) для предотвращения перегрузки усилителей сигналами с высокой амплитудой, которые отсутствуют при точной настройке частоты измерительной системы. В-третьих, он выполняет предварительное усиление с низким уровнем шума для обеспечения максимальной чувствительности к излучениям, уровень которых может быть на 130 дБ ниже пикового уровня измеренного сигнала на основной частоте радара.

Каждый компонент РЧ входного каскада рассматривается ниже.

РЧ аттенуатор является первым компонентом входного каскада. Он обеспечивает переменное ослабление (например, в пределах 0–70 дБ) с фиксированным приращением (например, 10 дБ/шаг аттенуатора). Использование этого аттенуатора в процессе измерений расширяет динамический диапазон измерительной системы на величину, равную максимально возможному ослаблению (например, 70 дБ для аттенуатора 0–70 дБ).

6.2.1 Измерительная система с ручным управлением

Измерение с ручным управлением выполняется путем качания частоты по спектру с фиксированным приращением (равным величине диапазона значений). При каждом качании частоты аттенуатор настраивается на поддержание пиковой мощности радара внутри динамического диапазона других элементов измерительной системы (часто ограничивающими элементами являются усилитель входного каскада и логарифмический усилитель анализатора спектра). После правильной настройки РЧ аттенуатора входного каскада при каждом качании частоты производится измерение мощности радара на текущей частоте.

Если необходимо измерять очень малые побочные излучения (т. е. когда разность уровня излучений на основной частоте и уровня побочных излучений превосходит текущую величину динамического диапазона измерений), то для предотвращения перегрузки предусилителя (и, как следствие, сжатия диапазона усиления) может быть использован полосовой фильтр с ручным управлением.

Последним элементом РЧ входного каскада является малощумящий усилитель (МШУ). Он устанавливается на трассе распространения сигнала непосредственно после преселектора. Входная характеристика МШУ обеспечивает высокую чувствительность к побочным излучениям радара с малой амплитудой, а его усиление компенсирует коэффициент шума остальных компонентов измерительной системы (например, длину линии передачи и анализатор спектра).

Чувствительность и динамический диапазон измерительной системы оптимизируются путем правильного выбора параметров усиления и коэффициента шума МШУ. Желательно минимизировать коэффициент шума и одновременно обеспечить достаточное усиление для всех измерительных цепей, следующих за МШУ (главным образом из-за потерь в РЧ линии, следующей за выходным каскадом, и коэффициента шума цепей анализатора спектра). В идеальном случае сумма усиления и коэффициента шума МШУ (который равен избыточному шуму, производимому МШУ с входной нагрузкой 50 Ом) должна быть примерно равна коэффициенту шума остальной части измерительной системы.

Типовое значение коэффициента шума анализатора спектра составляет 25–45 дБ (меняясь как функция частоты), и потери в линии передачи сигнала обычно могут достигать 5–10 дБ в зависимости от качества и длины линии. Изменение коэффициента шума измерительной системы в зависимости от частоты может потребовать использования набора МШУ, работающих в октавных полосах частот (например, 1–2 ГГц, 2–4 ГГц, 4–8 ГГц, 8–18 ГГц, 18–26 ГГц и 26–40 ГГц). Внутри каждой октавной полосы частот для каждого МШУ можно выбрать оптимальное усиление и коэффициент шума. Это также помогает согласовать МШУ с распределением октавных полос по разным ЖИГ-фильтрам (например, 0,5–2 ГГц, 2–18 ГГц и т. д.). Использование МШУ, включенного после преселектора (а при необходимости серии последовательно соединенных МШУ на входе анализатора спектра), может уменьшить общий коэффициент шума измерительной системы примерно на 10–15 дБ. Установлено, что такой диапазон значений коэффициента шума приемлем для измерения спектра широкополосного излучения радара в диапазоне до 130 дБ.

Предполагается, что оставшейся частью РЧ измерительной системы является серийно выпускаемый анализатор спектра или анализатор спектра с преселектором или селективным приемником. Можно использовать любое оборудование, которое позволяет принимать сигналы за пределами диапазона исследуемых частот.

6.2.2 Измерительная система с автоматическим управлением

Ключевым моментом эффективного использования аттенуатора РЧ входного каскада при измерении излучения радара, как показано на рисунке 3, является настройка измерительной системы на так называемых шагах, т. е. на диапазонах частот, отличающихся друг от друга на постоянную величину (например, 1 МГц). Этим данный режим отличается от режима ручного управления анализатором спектра, при котором выполняется более традиционная настройка на качание частоты по спектру. На каждом шаге с фиксированным изменением частоты аттенуатор настраивается на поддержание пиковой мощности радара внутри динамического диапазона других элементов измерительной системы (ограничивающими элементами часто являются усилитель входного каскада и логарифмический усилитель анализатора спектра). После правильной настройки РЧ аттенуатора входного каскада на каждом шаге производится измерение мощности радара на текущей частоте. Таким способом номинальный динамический диапазон измерительной системы, равный 60 дБ, расширяется на 70 дБ и достигает 130 дБ. Для сокращения времени измерений данным аттенуатором и алгоритмом измерений с обязательным пошаговым наращиванием частоты можно управлять с помощью компьютера.

Следующий элемент входного каскада – настраиваемый преселектор полосового фильтра – необходим, если нужно измерить побочные излучения с низкими уровнями мощности на частотах, смежных с основной частотой излучения радара со значительно более высоким уровнем (например, на 130 дБ ниже основной). Например, может потребоваться измерение побочных излучений радара службы управления воздушным движением на частоте 2900 МГц при уровне –120 дБм в измерительных цепях, в то время как уровень основного излучения составляет +10 дБм на частоте, отличающейся всего на 150 МГц (т. е. равной 2750 МГц). Система измерения требует, чтобы МШУ без аттенуатора измерял побочные излучения на частоте 2900 МГц, но если усилитель будет подвергнут неослабленному основному излучению на частоте 2750 МГц, в нем возникнет перегрузка (и, как следствие, диапазон усиления будет сжат). Поэтому во входном каскаде сигнал должен быть ослаблен с учетом частоты до подачи на вход МШУ. На практике для этой цели эффективно применяется регулируемая полосовая фильтрация, основанная на применении варакторов (на частотах ниже 500 МГц) или ЖИГ-кристаллов (на частотах, превышающих 500 МГц). Приемлемые фильтры могут производиться серийно и должны быть пригодны для автоматического отслеживания настроенной частоты измерительной системы.

Последним компонентом РЧ входного каскада является МШУ. Он устанавливается на трассе распространения сигнала непосредственно после преселектора. Входная характеристика МШУ обеспечивает высокую чувствительность к побочным излучениям радара с малой амплитудой, а его усиление позволяет ввести поправку на коэффициент шума остальных компонентов измерительной системы (например, на длину линии передачи и анализатор спектра).

Рассмотрение чувствительности и динамического диапазона измерительной системы, а также типового коэффициента шума анализатора спектра не отличается от проведенного в п. 6.2.1

В другом варианте конфигурации МШУ используется последовательное соединение МШУ. Первый МШУ установлен между двумя каскадами внутри полосового фильтра преселектора, в котором используется ЖИГ-кристалл или варактор. Он обладает низким коэффициентом шума, но вполне достаточным усилением, чтобы компенсировать потери во втором каскаде ЖИГ-фильтра. Второй (возможно, с худшими характеристиками) МШУ установлен непосредственно после ЖИГ-фильтра. При таком варианте достигается несколько более низкий коэффициент шума всей системы, поскольку наличие второго каскада ЖИГ-фильтра предусмотрено настройкой первого МШУ. Однако при этом может потребоваться более совершенный проект и техническая модификация фильтра преселектора, которую администрация может посчитать непрактичной.

Третий вариант конфигурации МШУ измерительной системы, не требующий какой-либо модернизации или модификации фильтра преселектора входного каскада, заключается в размещении одного МШУ с малым усилением во входном каскаде и второго МШУ на сигнальном входе анализатора спектра. Первый МШУ выбирается с очень низким коэффициентом шума, но с достаточным усилением для компенсации потерь в РЧ линии и коэффициента шума МШУ анализатора спектра. В свою очередь, МШУ анализатора спектра выбирается с такой амплитудной характеристикой, которая достаточна для компенсации коэффициента шума анализатора спектра в соответствующем диапазоне частот измерения радара. Такой комплект из двух последовательно соединенных МШУ приобрести, возможно, проще, чем один высококачественный МШУ, причем, как правило, пара предусилителей менее восприимчива к перегрузке, поскольку можно ожидать, что эффект от снижения усиления на 1 дБ будет выше, чем от такого же снижения усиления одиночного высококачественного МШУ.

Предполагается, что оставшейся частью РЧ измерительной системы является серийный анализатор спектра. Можно использовать любой анализатор спектра, который способен принимать сигналы, имеющие частоту, выходящую за пределы диапазона исследуемых частот, и которым можно управлять с помощью компьютера при реализации алгоритма пошагового изменения частоты. Как уже упоминалось выше, высокий коэффициент шума существующих в настоящее время анализаторов спектра должен компенсироваться предусилением с низким уровнем шума, если при измерении должна достигаться чувствительность, необходимая для наблюдения большинства побочных излучений.

Измерительной системой можно управлять с помощью любого компьютера, имеющего шинный (GPIB или эквивалентный) интерфейс, который совместим с контроллером компьютера и используемой интерфейсной платой. Исходя из показателей объема памяти и быстродействия, для этой цели вполне приемлемы современные персональные компьютеры. Алгоритм измерения (предусматривающий пошаговое изменение частоты анализатора спектра и преселектора, а также управление аттенуатором входного каскада с переменным ослаблением) должен быть реализован

программно. Используя определенное имеющееся на рынке программное обеспечение, можно приблизиться к выполнению этой задачи, но вероятно, что организация, производящая измерения, должна будет написать по крайней мере часть собственного программного обеспечения измерений. Хотя создание программного обеспечения требует существенных расходов, опыт использования подобных систем показал, что такие инвестиции оправданы, если измерения излучений радара должны проводиться часто и регулярно.

Данные могут быть записаны на жестком диске компьютера или на съемном диске. В идеальном случае запись данных осуществляется после каждых 100–200 шагов измерений, с тем чтобы сохранить размер файлов данных управляемым и предотвратить потерю значительного объема данных, если компьютер или другие компоненты измерительной системы откажут в процессе измерений.

6.3 Калибровка измерительной системы

6.3.1 Ручной метод прямых измерений

Метод ручного управления требует либо индивидуальной калибровки всех компонентов измерительной системы, либо использования измерительной установки с откалиброванным генератором (метод подстановки).

6.3.2 Автоматический метод прямых измерений

Измерительная система калибруется после отключения антенны от остальной части системы и подключения к той же точке РЧ линии шумового диода. Для удовлетворительной калибровки очень хорошо подходит диод с избыточной шумовой мощностью (ENR), равной 25 дБ (где ENR составляет отношение эффективного значения температуры шумового диода (в градусах Кельвина) к температуре окружающей среды (в градусах Кельвина)), если коэффициент шума всей системы меньше 20 дБ. При калибровке используется стандартный Y -факторный анализ по правилам, описанным в Дополнении 2 к Приложению 1, сравнения измеренных значений мощности по всему спектру при работающем шумовом диоде и при отключенном шумовом диоде.

В результате калибровки с помощью шумового диода составляется таблица значений коэффициента шума и поправок на усиление для всего диапазона частот, в котором должны проводиться измерения. Поправки на усиление могут храниться в справочной таблице и применяться к собранным измерительным данным. Более подробно процедура калибровки описана в Дополнении 2 к Приложению 1.

Антенна измерительной системы обычно не калибруется в полевых условиях. Коэффициенты коррекции для антенны (если они необходимы) применяются при анализе, используются в процессе анализа результатов измерений.

6.4 Процедура измерений

6.4.1 Ручной метод

Метод прямых измерений подробно описан в Дополнении 1 к Приложению 1, в настоящем разделе приводится краткое описание этого метода.

До начала измерений анализатор спектра используется для обнаружения сигналов, излучаемых не радаром: при наличии излучений, искажающих измерения, необходимо применить соответствующие фильтры.

Функция максимального удержания

Центральная частота анализатора спектра самая низкая частота, которая должна быть измерена (например, если центральная частота радара равна 3050 МГц, но необходимо проводить измерения в спектре 2–6 ГГц, начальная центральная частота анализатора спектра должна равняться 2 ГГц).

Разброс частот анализатора спектра = 10, 20, 50, 100 или 500 МГц.

Время качания частоты анализатора спектра > время автоматического качания.

Время > регистрация сигнала в течение не менее 3 интервалов обращения луча радара (например, если радар вращается со скоростью 40 об/мин или 1,5 с/об, длительность регистрации должна превышать $3 \times 1,5$ с; т. е. приемлемое время составляет 4,5 с). Регистрация сигнала на протяжении длительности, достаточной для формирования спектра. Для получения максимального сигнала реакции измерительной системы антенна радара может удерживаться в стационарном и ориентированном положении.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Настройка времени качания частоты анализатора спектра и длительности регистрации сигнала должна проверяться.

Второй важный момент процедуры измерений – настройка измерительной системы на следующий диапазон измеряемых частот. Оптимальное решение состоит в том, чтобы эта частота равнялась сумме первой измеряемой частоты и диапазона частот измерений.

В случае, когда измерительным прибором является селективный приемник, измерения выполняются на конкретных частотах, входящих в рекомендованную полосу частот.

6.4.2 Автоматический метод

Метод прямых измерений подробно описан в Дополнении 1 к Приложению 1; в настоящем разделе приводится краткое описание этого метода. Помимо параметров, перечисленных в п. 2, для анализатора спектра необходимо настроить следующие параметры:

Центральная частота анализатора спектра самая низкая частота, которая должна быть измерена (например, если центральная частота радара равна 3050 МГц, но необходимо проводить измерения в спектре 2–6 ГГц, начальная центральная частота анализатора спектра должна равняться 2 ГГц).

Разброс частот анализатора спектра = 0 Гц (анализатор функционирует как прибор во временной области).

Длительность шага анализатора спектра > интервала обращения луча радара (например, если радар вращается со скоростью 40 об/мин или 1,5 с/об, длительность цикла должна превышать 1,5 с; т. е. приемлемое время составляет 2 с). Для радаров с быстрой перестройкой частоты или радаров с антенной, сканирующей в вертикальной плоскости, время цикла, возможно, должно быть равно длительности нескольких периодов обращения антенны. Для более сложных РЛС время цикла должно определяться экспериментальным путем.

В нормальном режиме сканирования и при условии, что измерительная система настроена так, как описано выше, производится первое точечное измерение. Точка данных состоит из пары чисел: измеренного уровня мощности и значения частоты, для которой произведено измерение. Например, первой точкой данных для приведенного выше примера будет –93 дБм на частоте 2000 МГц. Точка данных получается путем наблюдения за излучением радара на заданной частоте при частотном разбросе 0 Гц для интервала (длительность шага), несколько превышающем период вращения антенны радара, или для большей длительности шага в случае сложных РЛС. Временная диаграмма наблюдения за вращением луча антенны радара будет отображена на экране анализатора спектра. Самая высокая точка на линии развертки будет, как правило, соответствовать мощности, полученной в момент, когда луч радара направлен на измерительную систему. Это максимальное значение полученной мощности отбирается (обычно управляющим компьютером, хотя может быть записано и вручную), корректируется с учетом усиления измерительной системы на данной частоте и регистрируется (обычно в файле данных, сохраняемом на магнитном диске).

Второе точечное измерение получают, настроив измерительную систему на следующую частоту измерения. При оптимальном выборе эта частота должна быть равна сумме первой частоты, на которой проводились измерения, и ширины полосы частот измерения (например, если первое измерение было получено на частоте 2000 МГц, а ширина полосы измерений составляла 1 МГц, то вторая частота измерений должна составлять 2001 МГц). Вся процедура повторяется на второй частоте: измеряется максимальная принимаемая мощность за период вращения луча радара, полученное значение корректируется с учетом коэффициента усиления, и результат записывается как точечное измерение.

Эта процедура, заключающаяся в пошаговом прохождении частот спектра (вместо качания частоты), выполняется до тех пор, пока не будет измерен весь необходимый спектр излучений. В процессе пошагового прохождения частот производится ряд отдельных измерений амплитуды на заранее заданных (точно настраиваемых) частотах исследуемого спектра. Оптимальное изменение частоты при переходе с одного шага на другой равно ширине полосы ПЧ. Например, для измерений в спектре шириной 200 МГц при ширине шага 1 МГц и ширине полосы ПЧ 1 МГц может потребоваться 200 шагов. Для ускорения процесса измерений в области побочных излучений можно выбрать увеличенную ширину шага. Однако на частотах, кратных частоте основного излучения радара (например, равных двум, трем, четырем частотам), максимальная длительность шага вновь должна быть примерно равна ширине полосы ПЧ измерительной системы.

Измерительная система остается настроенной на каждую частоту в течение определенного интервала измерений. Интервал называется длительностью шага или временем удержания. Время удержания на каждом шаге задается оператором измерительной системы и обычно несколько превышает длительность интервала сканирования луча радара.

Если описанный процесс (шаг, настройка, измерение, поправка на усиление и повтор) должен выполняться точно и эффективно, для управления процессом желательно использовать компьютер. Для корректного измерения пика основного излучения может потребоваться сокращение длительности шага до величины, не превышающей половины ширины полосы частот измерений в данном диапазоне.

Пошаговый метод необходим для обеспечения возможности включения РЧ аттенюатора во входной каскад измерительной системы, по мере того как частота приближается к центральной частоте (и любым другим пикам) спектра радара. Возможность дополнительного ослабления на частотно-избирательной основе позволяет расширить доступный для измерения динамический диапазон примерно до 130 дБ, если использовать в измерительной системе с мгновенным динамическим диапазоном 60 дБ РЧ аттенюатор с ослаблением 0–70 дБ. В этом состоит главное достоинство метода при обнаружении относительно маломощных побочных излучений. Для достижения подобного эффекта при измерениях с качанием частоты можно установить режекторный фильтр на центральной частоте радара, однако практически невозможно применять режекторный фильтр на всех других частотах спектра, на которых могут возникнуть высокоамплитудные пики.

Важно обеспечить достаточную полосовую фильтрацию во входном каскаде измерительной системы, с тем чтобы сильные внеполосные компоненты сигнала не влияли на измерение маломощных побочных компонентов.

Эти измерения могут выполняться без сканирования пространства лучом радара, но только если проверяется, что в диапазоне частот измерений направление луча относительно механической оси антенны не меняется.

6.4.3 Метод косвенных измерений

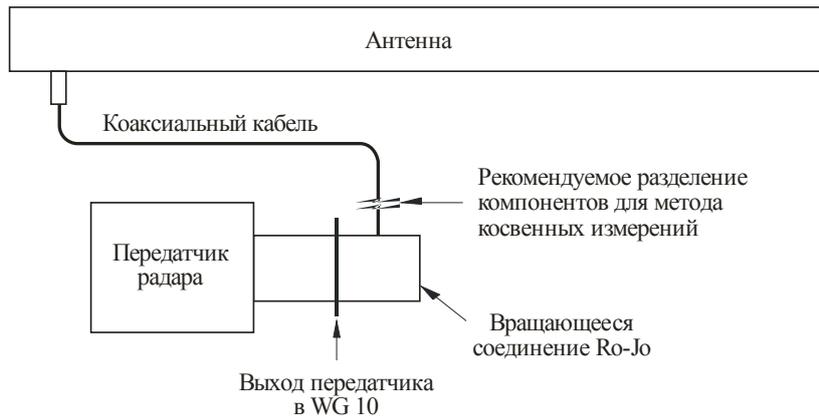
Рекомендованное разделение компонентов для применения косвенного метода представлено на рисунке 5. Измерительная процедура в рамках данного метода косвенных измерений, когда нежелательные излучения измеряются в точке вращающегося сочленения Ro-Jo, а затем объединяются с параметрами антенны, измеренными отдельно на расстоянии 5 м и 30 м с соответствующей поправкой на дальнее поле, заключается в следующем:

Шаг 1: Измерить излучения передатчика радара в точке вращающегося сочленения Ro-Jo с фидером (как показано на рисунке 6).

Шаг 2: Затем отдельно измерить максимальное усиление антенны радара на частотах излучения, определенных на шаге 1. Измерения выполняются на расстояниях 5 м для частот ниже 5 ГГц и 30 м для частот выше 5 ГГц (как показано на рисунке 7).

РИСУНОК 5

Типовая радиолокационная система

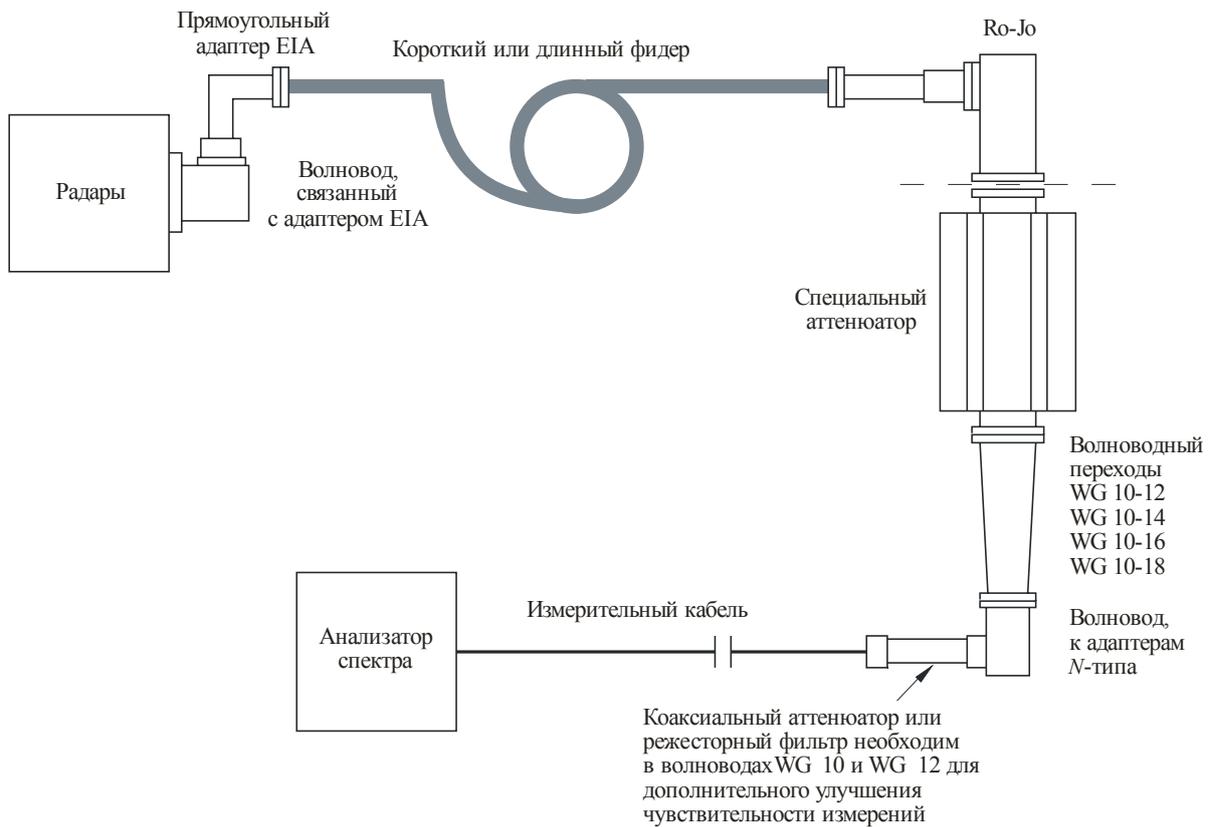


WG: Волновод

М.1177-05

РИСУНОК 6

Измерения на порте Ro-Jo



EIA: Ассоциация электронной промышленности

М.1177-06

Шаг 3: Скорректировать измеренные значения усиления с помощью соответствующего поправочного коэффициента (с помощью компьютерной программы или модели известной характеристики антенны. В простейшем случае для частот, на которых обнаружено излучение на шаге 1, можно воспользоваться программой, приведенной в Дополнении 4 к Приложению 1).

Шаг 4: И наконец, объединить результаты, полученные на шаге 1 и 3, получить э.и.и.м. на частотах обнаруженного нежелательного излучения.

6.4.3.1 Методы измерений и проблемы, связанные с волноводом

При измерении спектра выходной мощности передатчика существуют две проблемы. Первая из них связана с определением высокочастотных компонентов передаваемого спектра без искажений, а вторая – с измерением очень низких уровней излучений при наличии основной импульсной передачи, максимальная мощностью которой может составлять 60 кВт.

В любом волноводе мода TE_{10} может быть измерена с помощью откалиброванной измерительной системы. Характеристика такой системы должна быть такова, чтобы мощный основной сигнал ослаблялся в достаточной мере для защиты измерительного оборудования, а на других частотах ослабление было пренебрежимо малым, чтобы можно было измерить энергию моды TE_{10} .

Следует признать, что побочные излучения на выходе передатчика могут включать моды более высоких порядков, и эта возможность должна рассматриваться при настройке измерительной системы. Однако для простых радаров такое явление редко будет иметь важное значение, так как моды более высоких порядков, вообще говоря, подавляются в волноводно-коаксиальном переходе или фидере антенны и Ро-Ро антенны радара (т. е. волноводно-коаксиальные переходы предназначены только для передачи энергии в режиме TE_{10}).

6.4.3.2 Система для измерения нежелательных излучений в волноводе

Эта измерительная система позволяет с высокой точностью измерять низкие уровни излучений в присутствии импульсов радара, обладающих высокой мощностью.

Основными компонентами системы являются режекторный фильтр и набор суживающих волноводных переходов размером от WG 10 до меньшего, которые позволяют охватить весь исследуемый спектр частот. Режекторный фильтр объединяет прямой волновод WG 10 с внутренними поглощающими элементами, которые ослабляют основной сигнал, а на других частотах создают лишь незначительное ослабление. Для достижения требуемого ослабления в целях защиты измерительного оборудования и измерения излучения на более высоких частотах на выходе режекторного фильтра устанавливаются линейные переходы.

Плавный суживающий волноводный переход является фильтром верхних частот, который за счет обратного отражения подавляет сигналы на частотах ниже частоты среза. Если бы такой переход был установлен непосредственно на выходном порте передатчика радара, то его основной сигнал вернулся бы назад в передатчик, вызывая нежелательное рассогласование. Но при включении плавного волноводного перехода после режекторного фильтра отраженные сигналы поглощаются вторично. Таким образом, потери на отражение на основной частоте обычно составляют 34 дБ, т. е. достаточно малы для того, чтобы избежать затягивания частоты магнетрона.

Частоты выше частоты среза передаются через переходы и на измерительное оборудование. Если возможно, для предотвращения взаимодействия затухающих волн между суживающим волноводом и волноводно-коаксиальным переходом должна быть включена короткая волноводная секция.

6.4.3.3 Результаты измерений на порте вращающегося сочленения Ро-Ро

Метод измерений основан на поиске методом проб и ошибок частотного диапазона, в котором можно было бы расположить и распределить по частотам существенную часть побочных излучений, после чего излучение каждого выявленного уровня исследуется более детально с целью измерения его максимальной амплитуды.

6.4.3.4 Неточность измерений в волноводе

Точность измерения с помощью описываемой системы составляет $\pm 1,3$ дБ в полосе частот от 2 ГГц до 18,4 ГГц для волноводного порта. Значение общей неточности при уровне доверительной вероятности не менее 95% составляет $\pm 3,4$ дБ для волноводного порта волновода, включая анализатор спектра.

6.4.3.5 Измерение параметров усиления антенны на измеренной частоте излучения

При использовании косвенного метода рекомендуется проводить измерения на антенне в ближнем поле на открытом пространстве в контрольной точке (OATS) на расстоянии 5 м для частот ниже 5 ГГц и 30 м для частот выше 5 ГГц. Для приведения результатов измерений к эквивалентным значениям усиления в дальнем поле используются коэффициенты коррекции, которые обеспечивают приемлемую степень корреляции с усилением в дальнем поле. Типовая схема измерений показана на рисунке 7.

РИСУНОК 7

Схема проведения измерений усиления в ближнем поле на расстоянии 5 м и 30 м



М.1177-07

6.4.3.6 Процедура измерения усиления в ближнем поле на расстоянии 5 м и 30 м

Измерение максимального усиления исследуемой антенны (ИА) должно проводиться на измеренных или выявленных частотах побочных и внеполосных излучений с помощью метода, описанного в п. 6.4.3. На каждой измеренной или выявленной частоте излучения усиление ИА максимизируется сначала путем поворота на 360° , а затем дополнительно максимизируется путем перемещения исследуемого рупора вверх-вниз. Усиление ИА определяется путем измерения э.и.и.м. для каждого расстояния при известном уровне мощности на ИА на рассматриваемых частотах. Из уравнений (1) и (2) видно, как по измеренному уровню анализатора спектра S можно получить эквивалентное усиление в дальнем поле G_a .

$$G_a \text{ ИА (дБи)} = \text{измеренная э.и.и.м. (дБм)} - P_{input} \text{ (дБм)} + G_c \text{ (дБ)} \quad (1)$$

$$\text{Измеренная мощность э.и.и.м. (дБм)} = S \text{ (дБм)} + 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ (дБ)} - G_r \text{ (дБи)}, \quad (2)$$

где:

- G_a : эквивалентное усиление ИА в дальнем поле (дБи);
- P_{input} : мощность на входе ИА (дБ);
- G_c : коэффициенты коррекции усиления для расстояний 5 м и 30 м, которые можно рассчитать для ИА с помощью программы, приведенной в Дополнении 4 к Приложению 1;
- S : измеренный уровень анализатора спектра (дБм);
- G_r : усиление принимающей исследуемой рупорной антенны (дБи);
- d : расстояние, на котором проводится измерение (м);
- λ : длина волны на исследуемой частоте (м).

6.4.3.7 Коэффициенты коррекции и преобразования усиления

Компьютерная программа, приведенная в Дополнении 4 к Приложению 1, позволяет получить коэффициенты коррекции для дальнего поля по результатам измерений в ближнем поле для очень простого случая. Программа рассчитывает коэффициент коррекции для каждого расстояния на исследуемой частоте по изменению фазы принимаемой волны в поперечном сечении линейной антенны. (На ближних расстояниях волновой фронт является сферическим, а не линейным.) В результате получают значение максимального усиления антенны в точке, бесконечно удаленной от ближнего поля.

Важно помнить, что диаграмма распределения усиления антенны не рассматривается. Следует отметить, что на частотах побочных излучений электрическая длина антенны отличается от ее механической длины, она вполне может быть значительно меньше. Это объясняется отличием диаграммы распределения длины антенны на частотах, отличных от проектной частоты. Таким образом, в указанных случаях для обеспечения точности результатов могут потребоваться более сложная компьютерная программа или данные, полученные с помощью метода прямых измерений.

6.4.3.8 Неточность измерений усиления в ближнем поле и используемые коэффициенты коррекции

В худшем случае неточность измерений может составлять ± 6 дБ, включая погрешность анализатора спектра, усиление исследуемого рупора, потери в кабеле и источнике и несовершенство выбранного места расположения. Расчетное значение общей неточности при уровне доверительной вероятности не менее 95% составляет $\pm 4,2$ дБ.

При определении коэффициентов коррекции для указанных расстояний предполагается, что излучающая апертура ИА остается постоянной на всех частотах.

6.4.3.9 Получение спектра излучения передатчика радара через э.и.и.м. путем суммирования измеренных излучений и параметров усиления антенны

Метод, используемый для получения максимального значения э.и.и.м. ненаправленной антенны, заключается в сложении для каждой частоты излучения максимальной мощности, генерируемой передатчиком радара (дБм), с максимальным коэффициентом направленного действия (дБи), полученным для ИА. Это означает, что ИА необходимо исследовать лишь на тех частотах, на которых наблюдалось излучение передатчика радара.

Считается, что эффект рассогласования ИА автоматически учитывается при измерении усиления, поскольку исследуемые устройства согласованы на сопротивлении 50 Ом, номинальное сопротивление коаксиальных разъемов и излучения измерялись на приемнике, имеющем сопротивление 50 Ом.

6.4.3.10 Резюме

Метод косвенных измерений, являющийся более эффективным по затратам времени и использованию технических средств, достаточно чувствителен и позволяет измерять низкие уровни излучений с приемлемой точностью и стабильностью. Кроме того, он может использоваться при любых метеорологических условиях и легко позволяет расширить диапазон измеряемых частот до 40 ГГц и более. Его можно также с успехом использовать в совокупности с методом прямых измерений для оценки пошаговых изменений в данной РЛС, для которой ранее уже производились измерения.

Дополнение 1 к Приложению 1

Подробное описание процедур и программного обеспечения метода прямых измерений

При реализации прямого метода предполагается, что могут быть выполнены следующие условия:

- дальнейшее поле излучения радара может быть достигнуто с помощью измерительной системы, как описано в тексте данного Дополнения;
- нежелательное просачивание сигналов радара непосредственно в аппаратуру измерительной системы (т. е. в обход антенны измерительной системы) может быть снижено до достаточно низкого уровня для обеспечения точности результатов измерений.

При применении метода прямых измерений не требуется координирования функционирования радара с измерительной системой, хотя в некоторых случаях совместная работа может быть выгодной для ускорения измерений.

Метод прямых измерений заключается в следующем:

Шаг 1: определить место проведения измерений

Место проведения измерений должно находиться в пределах главного луча радара или как можно ближе к нему. Для радаров обнаружения наземных целей и некоторых других типов радаров добиться этого относительно просто, так как луч радара сканирует поверхность и требуется лишь разместить измерительную систему внутри этой области. Однако в различных радаров обнаружения воздушных целей главный луч не облучает непосредственно поверхность земли. Для таких радаров измерительная система должна быть расположена внутри максимальной зоны захвата поверхности. Эта зона может быть определена путем настройки измерительной системы на основную частоту радара и последующего перемещения измерительной системы на движущемся транспортном средстве из положения вблизи радара в удаленное от радара положение (порядка нескольких километров). Измерительная система используется для контроля уровня принимаемого сигнала в зависимости от местоположения системы. С этой целью следует использовать анализатор спектра с нулевым разбросом частот и временем качания частоты 500 с и наблюдать пиковый уровень каждые несколько секунд, когда луч радара проходит транспортное средство. Результатом является временная диаграмма, отражающая положения, в которых взаимосвязь максимальна.

Приемлемым должно быть любое местоположение в пределах зоны максимальной взаимосвязи. На практике установлено, что эта зона начинается не ближе 0,75 км от радара обнаружения воздушных целей и не далее 2 км от радаров тех же типов. Обычно существует не точно определенная точка, в которой наблюдается максимальная взаимосвязь, а целая зона в этих пределах.

Необходимо учитывать вопросы многолучевого распространения. Многолучевое распространение наблюдалось очень редко. Оно регистрировалось в тех случаях, когда радар и измерительная система были разделены спокойной гладкой водной поверхностью. В других случаях наличие между ними пересеченной местности и использование в измерительной системе антенны с параболическим отражателем минимизирует эффекты многолучевого распространения до такой степени, что ими можно пренебречь. Эффекты многолучевого распространения можно проверить, повторив измерения радара во втором местоположении и сравнив результаты измерений в обоих местоположениях. Кроме того, считается, что многолучевое распространение минимизируется за счет подъема измерительной антенны на телескопической мачте примерно на 10 м над уровнем земли. При этом также улучшается линия прямой видимости между радаром и измерительной системой.

Шаг 2: настроить измерительную систему и проверить наличие нежелательного просачивания сигналов

Измерительная система оборудуется антенной с параболическим отражателем, установленным на вершине 10-метровой мачты (необязательное оборудование) или по меньшей мере на высоте нескольких метров над уровнем земли, чтобы избежать эффектов многолучевого распространения и обеспечить приемлемое распространение по линии прямой видимости. Измерительная система должна быть настроена на основную частоту радара или частоту максимального излучения, если используется частотная модуляция или скачкообразное изменение частоты.

При необходимости проверить наличие просачивания нежелательных сигналов (т. е. нежелательного попадания энергии радара в измерительное оборудование, шунтирующее измерительную антенну). Наличие просачивания сигналов проверяется путем отключения измерительной антенны и подключения к входной линии нагрузки 50 Ом. При наличии просачивания сигналов выполнить следующие действия:

- убедиться, что стойки измерительного оборудования (если они имеются) загерметизированы;
- проверить надежность соединения разъемов;
- переместить измерительную систему радара в иное местоположение, где оборудование экранировано от радара зданиями или деревьями и где антенна поднята над этими препятствиями на телескопической мачте;
- переместить измерительную систему радара на большее расстояние от радара.

Надлежащим образом смонтированная измерительная система должна минимизировать вероятность просачивания нежелательных сигналов.

Шаг 3: определить параметры излучений радара

Перед началом измерений наиболее важными настраиваемыми параметрами являются интервал сканирования луча и эффективная полоса излучений. Интервал сканирования луча и другие параметры определяются путем настройки анализатора спектра на нулевой разброс частот и интервал качания частоты, равный нескольким секундам, с последующим наблюдением за сканированием луча радара.

Определение полосы частот излучения производится по правилам, описанным в основном тексте настоящего Приложения, с помощью анализатора спектра, который настроен на основную частоту радара при нулевом разбросе частот, а для его полосы ПЧ и полосы частот видеосигналов первоначально задана максимально возможная ширина. Затем ширину полосы ПЧ уменьшают всякий раз, когда луч радара проходит измерительную систему и отмечается полоса частот, при которой уровень принимаемой мощности падает. Таким образом определяется самая широкая полоса частот измерений, ширина которой меньше ширины полосы излучений радара. Такая полоса частот измерений будет использоваться, пока не возникнет необходимость в изменении этого параметра, например возникнет необходимость наблюдения радара в конкретной полосе частот приемника.

Дополнительными параметрами излучения радара, которые следует учитывать, являются частота повторения импульсов, флуктуация временного положения импульсов (если таковая возникает), разнесение импульсов (если имеется) и длительность импульсов. Первые три параметра можно измерить с помощью осциллографа, подключенного к видеовыходу анализатора спектра. Длительность РЧ импульсов (измеряемая на уровне 50% напряжения импульса) и время нарастания (в диапазоне 10–90% напряжения импульса) должны измеряться измерителем пиковых значений мощности или подходящим широкополосным РЧ детекторным диодом, работающим в диапазоне квадратичной реакции. Диод должен быть корректно согласован с осциллографом, имеющим достаточную полосу частот для отображения формы импульсов без искажений, возникающих из-за ограниченности полосы частот детектора.

Шаг 4: откалибровать измерительную систему

Метод прямых измерений с ручным управлением:

- При использовании этого метода необходимо откалибровать все измерительные компоненты индивидуально или всю установку в целом.

Метод прямых измерений с автоматическим управлением:

- См. Дополнение 2 к Приложению 1. Рекомендуется откалибровать шумовой диод, хотя можно воспользоваться другими методами, в которых применяются генераторы сигналов.

Шаг 5: задать параметры программного обеспечения измерительной системы (только при автоматическом методе)

Для программного обеспечения измерительной системы необходимо задать начальную частоту (МГц), конечную частоту (МГц), размер шага (МГц), интервал между шагами (МГц), ширину полосы ПЧ (МГц), ширину полосы частот видеосигналов (не меньше ширины полосы ПЧ), параметры детектора (величина положительного пика), эталонный уровень анализатора спектра (обычно 10 дБм), начальное ослабление на начальной частоте (обычно 0 дБ), дополнительные данные, относящиеся к местоположению измерений (например, название радара, название проекта измерений и т. д.).

Шаг 6: проверить линейность при выполнении измерений

Важно поддерживать целостность измерений, проверяя линейность в ходе измерений. При измерениях как на основной частоте, так и в области побочных излучений линейность системы должна проверяться путем периодического включения РЧ ослабления на 10 дБ в радиочастотном входном каскаде перед МШУ. Результат всегда должен быть одинаков: снижение уровня измеренного сигнала на 10 дБ. Если наблюдаемое снижение уровня отличается от 10 дБ, либо входной каскад перегружен, либо имеет место просачивание нежелательных сигналов. Надлежащая схема системы позволяет минимизировать эти потенциальные проблемы. Если же они все-таки возникают, можно предложить либо принять дополнительные шаги по защите измерительной системы, либо переместить ее в другое местоположение, как описано выше, на шаге 2.

Шаг 7: измерить излучение радара в нескольких диапазонах ПЧ (рекомендуемое, но не обязательное требование)

Возможно, целесообразно измерить излучение радара в нескольких диапазонах частот. Подобные измерения позволяют однозначно судить об изменении измеренной мощности радара, зависящей от ширины полосы частот приемника, на любой данной частоте спектра.

Дополнение 2 к Приложению 1

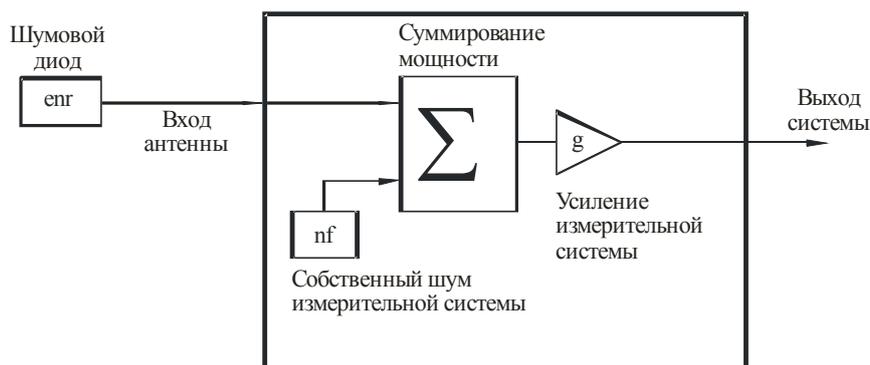
Калибровка усиления и коэффициента шума с помощью шумового диода

Калибровка измерительной системы должна производиться перед каждым измерением в спектре излучения радара. При выполнении измерения к каждой точке измерений может быть автоматически добавлена коррекция усиления. При коэффициенте шума измерительной системы, не превосходящем 20 дБ, можно использовать калибровку (проводимую по описанным ниже правилам) с помощью Y-факторного анализа на основе шумового диода. В настоящем Дополнении описаны теоретические вопросы и процедура такой калибровки.

Калибровка шумового диода приемника, настроенного на конкретную частоту, может быть описана в терминах компонентов с сосредоточенными параметрами (см. рисунок 8). На этом рисунке символом Σ обозначена функция суммирования мощности, линейно суммирующая любую мощность на входе измерительной системы с мощностью собственных шумов системы. Символом g обозначено общее усиление измерительной системы. Коэффициент шума измерительной системы имеет обозначение n_f , а коэффициент избыточного шума шумового диода – e_{ng} . (В настоящем Дополнении все алгебраические величины, обозначенные строчными буквами, например g , имеют линейные единицы измерения. Все величины, обозначенные прописными буквами, например G , измеряются в децибелах).

РИСУНОК 8

Блок-схема калибровки в форме компонентов с сосредоточенными параметрами на основе шумового диода



М.1177-08

Коэффициент шума – это отношение мощности шума устройства n_{device} (Вт) и теплового шума:

$$\frac{n_{device}}{k T B},$$

где:

k : постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К);

T : температура системы (К);

B : ширина полосы частот (Гц).

Коэффициент избыточного шума равен разности коэффициента шума и 1, что превращает его в долю мощности, превышающей тепловой шум $k T B$. Коэффициент шума системы определяется по формуле $10 \times \log$ (коэффициент шума). Этот показатель можно использовать, поскольку в определении коэффициента избыточного шума учитывается множество источников шума.

При калибровке с помощью шумового диода особую важность имеет определение разности выходных сигналов при включенном и отключенном шумовом диоде. При включенном шумовом диоде мощность P_{on} (Вт) рассчитывается по формуле:

$$P_{on} = (nf_s + enr_d) \times g k T B,$$

где:

nf_s : коэффициент шума системы;

enr_d : enr шумового диода.

При отключенном шумовом диоде мощность P_{off} (Вт) рассчитывается по формуле:

$$P_{off} = (nf_s) \times g k T B.$$

Y-фактор является отношением мощности P_{on} и мощности P_{off} :

$$y = \left(\frac{P_{on}}{P_{off}} \right) = \frac{(nf_s + enr_d)}{nf_s}$$

$$Y = 10 \log(y) = 10 \log \left(\frac{P_{on}}{P_{off}} \right) = P_{on} - P_{off}.$$

Следовательно, коэффициент шума измерительной системы может быть выражен как:

$$nf_s = \frac{enr_d}{y-1}.$$

Коэффициент шума измерительной системы равен:

$$NF_s = 10 \log \left(\frac{enr_d}{y-1} \right) = ENR_d - 10 \log (y-1) = ENR_d - 10 \log (10^{Y/10} - 1).$$

Поэтому:

$$g = \frac{P_{on} - P_{off}}{enr_d \times k T B},$$

$$G = 10 \log (p_{on} - p_{off}) - 10 \log (enr_d \times k T B)$$

или

$$G = 10 \log \left(10^{P_{on}/10} - 10^{P_{off}/10} \right) - ENR_d - 10 \log (k T B).$$

При калибровке с помощью шумового диода предыдущее соотношение используется для вычисления усиления измерительной системы по измеренным значениям шумового диода.

Хотя для вычисления коэффициента шума измерительной системы может использоваться выражение для NF_s , в программном обеспечении может быть реализовано эквивалентное выражение:

$$nf_s = \frac{P_{off}}{g k T B},$$

$$NF_s = 10 \log (p_{off}) - 10 \log (g k T B) = P_{off} - G - 10 \log (k T B)$$

и, подставляя выражение для усиления в предыдущее уравнение, получаем:

$$NF_s = P_{off} + ENR_d - 10 \log \left(10^{P_{on}/10} - 10^{P_{off}/10} \right).$$

Значения усиления и коэффициента шума, вычисленные по этим формулам, можно сохранить в справочной таблице. Значения усиления используются для коррекции использованных точек измерений на частотах измерений.

Вся трасса распространения сигнала, исключая антенну, калибруется с помощью шумового диода в качестве источника шума до начала измерения спектра радара. Шумовой диод подключается к входу первой РЧ линии вместо приемной антенны. В зависимости от сценария измерений, соединение может быть произведено вручную или с помощью реле. Уровень шума системы измеряется при включенном шумовом диоде на множестве точек на протяжении всего диапазона частот системы. Измерение шума производится при ширине полосы ПЧ, равной 1 МГц, и ширине полосы частот видеосигналов, равной 1 кГц. Затем шумовой диод отключается, и уровень шума системы вторично измеряется на том же множестве частот. Компьютер измерительной системы собирает множество значений P_{on} и P_{off} , относящихся к частотам измерений. Эти значения используются для определения усиления и коэффициента шума измерительной системы по приведенным выше равенствам.

Дополнение 3 к Приложению 1

Измерение длительности импульса и времени нарастания/спада импульса

1 Введение

Настоящее Дополнение служит в качестве руководства по измерению параметров импульсов радаров, необходимых при использовании маски излучений в области внеполосных излучений. Нежелательные излучения РЛС в области внеполосных излучений рассмотрены в Приложении 8 к Рекомендации МСЭ-R SM.1541. Для определения необходимой полосы частот B_n и ширины полосы частот B_{40} , измеряемой на уровне 40 дБ, должны быть измерены длительность импульсов t и время нарастания t_r импульсных РЛС².

Для импульсных РЛС длительность импульса t измеряется на уровне -6 дБ (при уровне напряжения, равном 50%). Время нарастания t_r или время спада t_f измеряются при изменении переднего или заднего фронта импульсов соответственно в диапазоне между уровнями -0,9 дБ и -20 дБ (при уровне напряжения в диапазоне от 10% до 90%). Для фазокодированных импульсов в качестве величин t_r и t_f используются значения времени нарастания/спада субимпульсов. Если субимпульсы неразличимы, можно предположить, что время t_r составляет 40% от времени переключения с одной фазы или субфазы на другую.

В радаров некоторых типов длительность импульсов и время нарастания или спада могут измеряться в проводном соединении с направленным ответвителем. Однако параметры излучаемых импульсов могут отличаться от импульсов, измеренных в направленных ответвителях. Кроме того, в радаров некоторых типов направленные ответвители не предусмотрены. Для таких радаров длительность импульсов и время нарастания или спада могут измеряться по энергии излучения, если измерительная система обладает полосой частот достаточной ширины (т. е. превосходящей $(10/t_r)$ или шириной полосы, которую можно соответствующим образом скорректировать для определения истинного времени нарастания). Потенциальным препятствием для измерения длительности импульсов по энергии излучения является многолучевое распространение энергии, вызывающее ступенчатое снижение на заднем фронте каждого излучаемого импульса. Этот эффект может быть минимизирован за счет использования в измерительной системе антенны с параболическим отражателем. Если влияние многолучевого распространения можно в достаточной мере подавить на первой ступени заднего фронта, сделав его на 6 дБ меньше номинального уровня импульса, то измерение длительности импульсов по излучению возможно при выполнении требований к ширине полосы частот³. Для получения достаточно широкой полосы частот необходимо использовать широкополосный диодный детектор.

2 Измерения для традиционных радаров

2.1 Измерения импульсов, поступающих по проводным линиям

Блок-схема установки для измерения параметров импульсов, поступающих по проводным линиям, показана на рисунке 9. Коаксиальный кабель с подходящим полным сопротивлением соединяет выход направленного ответвителя с входом широкополосного (ширина полосы частот превосходит $(1/t_r)$) полупроводникового детектора. Атенюатор с переменным ослаблением (например, 0–70 дБ) встроен между ответвителем и детектором. До подключения детектора аттенюатор первоначально настраивается на достаточно высокий уровень ослабления для защиты полупроводникового

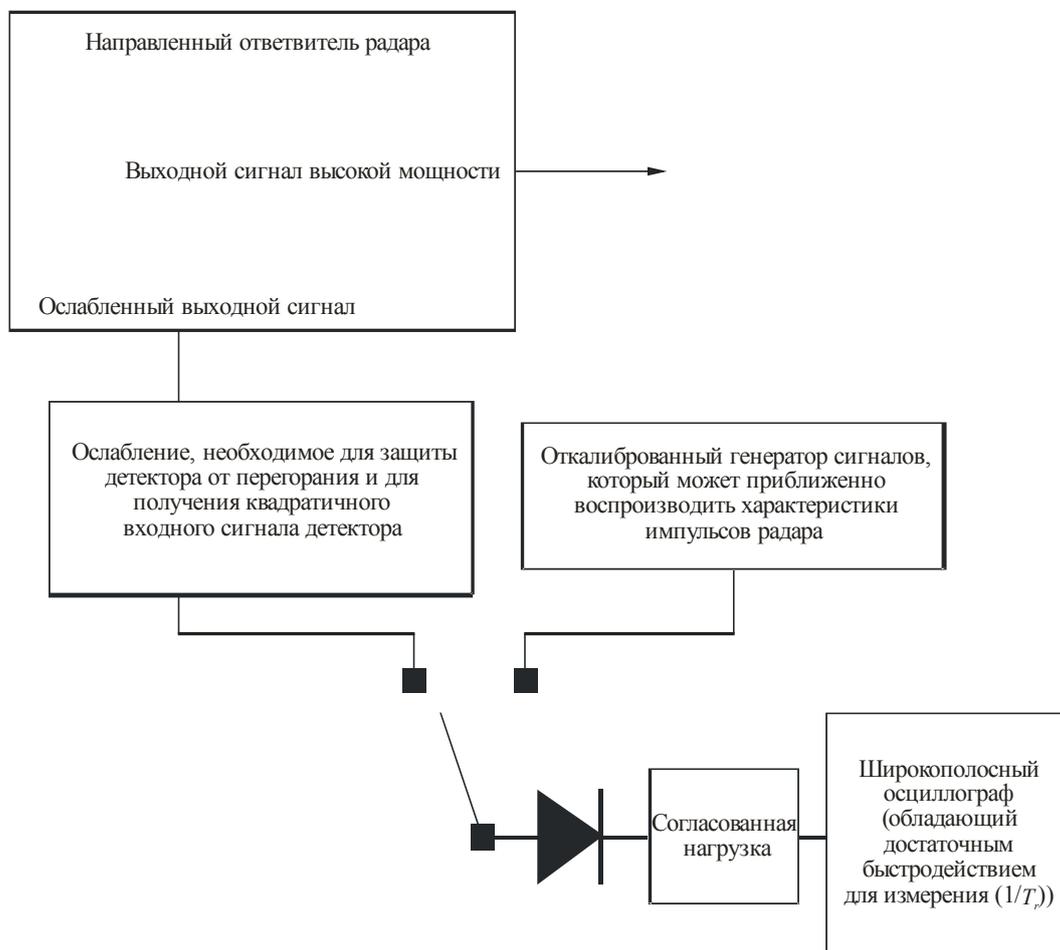
² Если время спада t_f импульса радара меньше времени нарастания t_r , то в уравнениях Рекомендации МСЭ-R SM.1541 вместо времени нарастания следует использовать время спада.

³ Например, время нарастания импульса длительностью 1 мкс может быть меньше 0,1 мкс. Поэтому для точного измерения времени t_r ширина полосы частот должна превосходить 10 МГц. Полоса частот современных осциллографов достигает 2 ГГц. Для измерения времени нарастания/спада импульсов должны использоваться осциллографы с полосой частот не менее 500 МГц. Полоса частот должна быть доступна в режиме однократного запуска осциллографа (без повторяющейся выборки), так как измерения производятся на одиночных импульсах радара.

детектора от повреждения⁴. В отсутствие других данных можно предположить, что максимально допустимый уровень входного сигнала детектора равен +20 дБ.

РИСУНОК 9

Блок-схема измерения длительности и времени нарастания (или времени спада) импульсов радара при использовании проводных соединений с направленным ответвителем



M.1177-09

Выход детектора соединяется с осциллографом, ширина полосы частот которого превышает $(1/t_r)$. Полные сопротивления должны быть согласованы надлежащим образом; величина полного входного сопротивления большинства современных осциллографов может быть выбрана оператором. Обычно выбирается значение 50 Ом. На входе осциллографа должна использоваться связь по постоянному току.

Осциллограф настраивается для отображения и регистрации⁵ огибающей импульсов радара. Настройка аттенюатора с переменным ослаблением записывается оператором измерительной системы.

⁴ Начальная настройка аттенюатора может быть получена с учетом пикового уровня мощности радара и заданными вносимыми потерями в направленном ответвителе.

⁵ Большинство осциллографов могут записывать данные на внутренний диск или передавать их на внешний компьютер по шине IEEE-488 (GPIB). Запись может также производиться путем фотографирования экрана осциллографа цифровой камерой в режиме стоп-кадра.

Затем линия соединения направленного ответвителя радара отключается от этого устройства и подключается к выходу откалиброванного генератора сигнала, который способен воспроизводить импульсы примерно той же длительности, что и измеренные импульсы радара. Выход генератора сигналов настраивается на генерирование на осциллографе амплитудной характеристики, которая одинакова для обеих огибающих, предпочтительно с точностью около +10 дБм.

После такой настройки реакция полупроводникового детектора может быть откалибрована следующим образом. Выход генератора сигналов уменьшается последовательно на 0,9 дБ, 6 дБ и 20 дБ⁶. На каждом из этих уровней на измеренную огибающую импульсов наносятся вертикальные маркеры. Полученные интервалы времени между вертикальными маркерами дают длительность импульсов (расстояние между точками 6 дБ), время нарастания (расстояние между точками 0,9 дБ и 20 дБ на переднем фронте) и время спада (расстояние между точками 0,9 дБ и 20 дБ на заднем фронте).

2.2 Измерение импульсов по излучению

Характеристики импульсов радаров, в которых отсутствуют направленные ответвители, можно измерить только по излучению. На рисунке 10 приведена блок-схема установки для измерения излучаемых импульсов.

РИСУНОК 10

Блок-схема измерения длительности и времени нарастания (или времени спада, если оно меньше времени нарастания) импульсов радара при использовании импульсов излучения



М.1177-10

Измерения следует проводить в соответствии с приведенной ниже процедурой:

Шаг 1: Разместить измерительную систему в местоположении на линии прямой видимости от передающей антенны радара и максимально близко к ней, не допуская ухудшения характеристик измерительной системы (например, возникновения просачивания), потери мощности сигнала радара при прохождении ниже главного луча или нахождения внутри ближнего поля относительно антенны радара или измерительной антенны.

Шаг 2: Использовать в измерительной системе антенну с высоким усилением (например, параболическую антенну диаметром не менее 1 м при работе на сверхвысоких частотах) для приема излучаемых радаром импульсов с максимально возможной амплитудой и различения их на фоне сигналов других передатчиков.

⁶ Выходы полупроводниковых детекторов не обязательно являются линейными, поэтому уровни 10%, 50% и 90% напряжения входных радиочастотных сигналов могут не соответствовать аналогичным уровнями напряжения на выходе постоянного тока детектора. Необходимо, чтобы для откалиброванного генератора сигналов были определены фактические уровни выходного постоянного напряжения, которые соответствуют указанным входным напряжениям.

Шаг 3: На входе измерительной антенны установить полосовой фильтр, пропускающий сигналы с основной частотой радара и имеющий полосу частот, ширина которой превосходит $(1/t_r)$, где t_r – время нарастания измеряемых импульсов радара. После полосового фильтра установить диодный детектор, скорость реакции в полосе частот и в период нарастания сигнала которого превосходит $(1/t_r)$, где t_r – время нарастания измеряемых импульсов радара⁷.

Шаг 4: Подсоединить выход детектора ко входу осциллографа. Полное выходное сопротивление детектора должно быть согласовано с полным входным сопротивлением осциллографа. Осциллограф должен иметь в режиме однократного запуска полосу частот, ширина которой превосходит $(1/t_r)$, где t_r – время нарастания измеряемых импульсов радара. Установить осциллограф в режим однократного запуска с достаточно низким порогом срабатывания для гарантированного перехвата импульсов радара. Дождаться окончания регистрации набора импульсов. Увеличить порог срабатывания и дождаться, пока второй набор импульсов активизирует триггер. Продолжать описанный процесс, пока порог не станет столь высоким, что регистрация импульсов прекратится. Слегка снизить порог срабатывания и дождаться регистрации последовательности импульсов. Эта последовательность импульсов покажет частоту повторения импульсов.

Шаг 5: Измерить длительность импульсов и время нарастания или время спада с помощью осциллографа, учитывая критерии, определенные выше для измерения импульсов, поступающих по проводным линиям.

2.3 Замечания по процедуре измерения излучаемых импульсов

При размещении измерительной системы в непосредственной близости от радара и на линии прямой видимости минимизируются проблемы, связанные с многолучевым распространением, а мощность принимаемых импульсов максимально возрастает. Использование обладающей высоким усилением антенны измерительной системы дополнительно смягчает последствия многолучевости и увеличивает уровень мощности принимаемых импульсов.

Необходимо предусмотреть, чтобы все элементы измерительной системы обладали полосой частот и временными характеристиками, подходящими для измерения времени нарастания импульсов радара. Для выполнения этого требования, скорее всего, необходимы диодные детекторы с малым временем реакции.

В случае работы нескольких радаров или в условиях наличия сильных сигналов, излучаемых не радаром, значения частоты которых близки или совпадают со значениями частоты сигналов, излучаемых радаром, могут потребоваться дополнительные меры для отделения измеряемых импульсов, излучаемых радаром, от остальных сигналов. Использование антенн с параболическим отражателем для радаров, работающих на сверхвысоких частотах, а также полосовых фильтров, подключенных к терминалам измерительных антенн, помогает выделить нужные импульсные сигналы. Если перечисленных средств недостаточно для выделения нужных импульсов, следует применять срабатывание в зависимости от уровня амплитуды, предполагая, что амплитуда измеряемых импульсов в измерительной системе превышает амплитуды любых других сигналов, распространяющихся в окружающей среде.

3 Измерения для радаров на базе передовых технологий

3.1 Измерение импульсов, поступающих по проводным линиям

В данном контексте радаром на базе передовых технологий считаются те, в которых используется импульсная модуляция. Модуляция может быть частотной или фазовой. При использовании частотной модуляции (внутриимпульсной частотной модуляции) могут применяться уже рассмотренные выше методы измерений. Однако ширина полосы частот измерений должна быть не менее общего диапазона частот внутриимпульсной модуляции. На практике для этого может потребоваться использование широкополосного диодного детектора.

Измерения времени нарастания импульсов с линейной частотной модуляцией выполняются так же, как и немодулированных импульсов; при необходимости можно воспользоваться описанной выше процедурой.

⁷ Пиковая входная мощность детектора должна уменьшаться в диапазоне квадратичной реакции. Для получения подходящего уровня входной мощности, возможно, между полосовым фильтром и диодным детектором потребуются установить аттенюатор или усилитель.

Коэффициент сжатия импульсов (для импульсных систем с частотной модуляцией): Измерения, проводимые для определения сжатия импульсов, описаны ниже. Этот подход применим для определения сжатия импульсов любых РЛС, в том числе и базирующихся на передовых технологиях.

Для фазокодированных импульсных радаров измерение длительности импульсов также выполняется по описанным выше правилам. Однако измерить время нарастания отдельных фазовых сегментов (чипов) сложно. Во-первых, трудности связаны с обычным фазовым кодированием, при котором между чипами может произойти сдвиг фазы на π . Хотя фаза и сдвинута, на выходе детектора наблюдается квадрат амплитуды сигнала и информация о фазе удаляется. В результате фронты чипов становятся в принципе ненаблюдаемыми при использовании детектора любого типа.

При применении на фазовых переходах между чипами могут возникать переходные процессы, которые можно наблюдать на экране осциллографа. Однако наблюдение за переходами между чипами не позволяет измерить время нарастания чипа.

Общее число субимпульсов в каждом импульсе (для систем с фазовым кодированием): В радаров, использующих общепринятый сдвиг фаз с мгновенным переключением на $\pm 180^\circ$, обычно происходят переходные процессы, которые можно наблюдать в огибающей обнаруживаемых импульсов. Таким способом можно определить число чипов в каждом импульсе. Однако в РЛС, использующих частотную манипуляцию минимальным сдвигом (MSK) или другие методы сдвига фаз, устраняющие такие переходные процессы, определить число чипов в каждом импульсе, измеряя огибающую выявленных импульсов, невозможно. В таких радаров пара проводных соединений для контроля каналов I и Q недоступна, число чипов можно определить только по справочным материалам, например техническим руководствам, руководствам по эксплуатации и спецификациям.

Измерение времени нарастания чипа: Для обычных фазокодированных импульсов время нарастания чипа можно измерить непосредственно, только если замеры формы сигнала производятся до начала детектирования. Это можно сделать, подключив ПЧ выход⁸ анализатора спектра к векторному анализатору сигналов или подобному устройству цифровой обработки данных.

Для улучшенных фазокодированных импульсов дискретное изменение фазы между чипами не используется. Вместо этого применяется MSK. При MSK требование к наблюдению времени нарастания чипа заключается в разделении компонентов I и Q импульса и наблюдении времени нарастания отдельно для каждого компонента. Это можно осуществить с помощью соответствующим образом запрограммированного векторного анализатора сигналов (VSA) (или специализированного цифрового процессора сигналов (DSP) или программируемой вентильной матрицы (FPGA)), в который поступают сигналы с РЧ выхода анализатора спектра.

Если в организации, производящей измерения, отсутствует описанное выше оборудование, чувствительное к изменениям фазы (устройства VSA, DSP или FPGA с установленным подходящим программным обеспечением), измерение времени нарастания импульса можно произвести на нарастающем фронте импульса вместо непосредственного измерения времени нарастания чипа. Измерение времени нарастания выполняется по описанным выше правилам. Факт использования подобного способа измерений должен быть отражен в полученном наборе данных.

3.2 Измерение импульсов по излучению

В современных радаров, в которых отсутствует направленный ответитель (например, в системах, использующих модули многоканальной передачи), характеристики импульсов должны измеряться по излучению описанными выше методами. Необходимо обеспечивать поддержание приемлемой полосы частот при измерении времени нарастания импульсов, а вход диодного детектора должен допускать подачу сигналов с амплитудой, равной квадрату реакции детектора.

⁸ Предполагается, что связывание ПЧ выхода от анализатора спектра выполняется до схем детектирования и разрешения по полосе пропускания таким образом, что поддерживается достаточная ширина полосы для измерения времени нарастания импульсов.

3.3 Использование справочных материалов при определении характеристик импульсов

Можно предположить, что руководства по эксплуатации, технические характеристики и другие справочные материалы по конкретному радару достаточно точны для всего набора радаров определенной модели или серии, хотя необходимо понимать, что каждый радар может несколько отличаться от усредненного изделия, описанного в документации. Подобное отличие объясняется, очевидно, изменениями качественного характера в производственном процессе и техническом обслуживании радара на месте эксплуатации. Если один или несколько важных параметров импульсов не могут быть измерены непосредственно, для вычисления маски излучения могут использоваться значения параметра, которые указаны в справочных документах.

Дополнение 4 к Приложению 1

Расчет коэффициента коррекции усиления для плоской антенной решетки с помощью программы на языке BASIC

Данная программа, написанная на языке BASIC, позволяет определить параметры в дальнем поле по результатам измерений в ближнем поле. В программе используются только данные об изменениях фазы принимаемой волны вследствие различия между сферическим РЧ волновым фронтом и фронтом плоской антенной решетки. Таким образом, программу можно использовать только для определения направления максимального излучения или максимального коэффициента усиления антенны в точке усиления антенны, бесконечно удаленной от ближнего поля. Диаграмма распределения усиления антенны здесь не рассматривается.

Проверка данных на погрешность – .025 π радиан, погрешность ~.3 дБ

```
'freq = 3000
```

```
'l = 10
```

```
'd = 1
```

```
,
```

```
CLS
```

```
,
```

```
INPUT "Ввести частоту антенны (в МГц)"; freq
```

```
INPUT "Теперь ввести расстояние от антенны, на котором производится измерение (в метрах)"; l
```

```
INPUT "Введите максимальный размер антенны (в метрах)"; d
```

```
,
```

```
,
```

```
,
```

```
CONST c = 300
```

```
CONST pi = 3,141592654#
```

```
,
```

```

'
lamda = c / freq
num = 100
'
'
IF d < (5 * lamda) THEN
    PRINT "Размер антенны должен быть значительно больше (*5), чем"
    PRINT "длина волны для правильного использования программы"
    STOP
END IF
'сумма совпадающих по фазе и сдвинутых на 90° составляющих поля
sumi = 0
sumj = 0
'
'система симметрична, поэтому интегрировать от 0 до d/2
FOR i = 0 TO num - 1
    dprime = i * d / (2 * (num - 1))
    phasediff = (1 - ((1 ^ 2) + (dprime ^ 2)) ^ .5) * 2 * pi / lambda
'    PRINT "разность фаз равна";
'    PRINT USING "##.##"; phasediff;
    icomp = COS(phasediff)
    sumi = sumi + icomp
    jcomp = SIN(phasediff)
    sumj = sumj + jcomp
NEXT i
PRINT "Максимальная погрешность по фазе равна";
PRINT USING "##.##"; phasediff / pi;
PRINT "* π радиан"
'сформировать окончательную планарную составляющую поля сферической РЧ волны
res = ((sumj) ^ 2 + (sumi) ^ 2) ^ .5
'PRINT "Результат равен"; res; "i равно"; i; "num равно"; num
'рассчитать уменьшение усиления
gprime = num / res
'
glog = 20 * (LOG(gprime) / LOG(10#))
PRINT "Уменьшение усиления по отношению к бесконечно удаленному полю равно";

```

```
PRINT USING "##.###"; glog;  
PRINT "дБ"  
END
```

Приложение 2

Измерение нежелательных излучений радиолокационных систем, описанных в пп. 2 и 3 раздела *рекомендует*

1 Введение

Рекомендуемые методы называются методами прямых и косвенных измерений. Метод прямых измерений позволяет точно измерить нежелательное излучение радаров (описанных в пп. 2 и 3 раздела *рекомендует*) путем измерения излучаемых сигналов в свободном пространстве. С помощью косвенного метода измеряются сигналы на выходе передатчика, затем они объединяются с моделями последующей системы для оценки напряженности поля в свободном пространстве. Сравнение двух методов показало, что их результаты очень близки и отличаются не более чем на 2 дБ.

2 Эталонная полоса частот

Вообще говоря, правила определения эталонной полосы частот для радаров с более высокой частотой (см. Приложение 1) применимы к радарам с меньшей частотой с использованием подходящего масштабирования параметров сигналов.

Эталонная полоса частот радиолокационной системы B_{ref} , используемая при определении предельных уровней нежелательных излучений (Рекомендации МСЭ-R SM.329 и МСЭ-R SM.1541, а также Приложение 3 к Регламенту радиосвязи) должна рассчитываться для каждой конкретной РЛС. Таким образом, для трех основных типов импульсной модуляции, используемой в РЛС для радионавигации, радиолокации, захвата цели на автоматическое сопровождение, слежения и других функций радиоопределения, ширина эталонной полосы определяется по следующим формулам:

- в случае радаров на фиксированной частоте без импульсного кодирования – единица, деленная на длительность импульса радара в секундах (например, если длительность импульса РЛС равна 100 мкс, то ширина эталонной полосы составит $1/100 \text{ мкс} = 10 \text{ кГц}$);
- в случае радаров на фиксированной частоте с фазово-импульсным кодированием – единица, деленная на длительность фазокодированного чипа в секундах (например, если длительность фазокодированного чипа равна 200 мкс, то ширина эталонной полосы составит $1/200 \text{ мкс} = 5 \text{ кГц}$);
- в случае радаров с частотной модуляцией (ЧМ) или с линейной частотной модуляцией – корень квадратный из величины, полученной путем деления ширины полосы чипа в МГц на длительность импульса в мкс (например, если ЧМ охватывает полосу от 1250 до 1251 МГц или 10 кГц во время действия импульса длительностью 20 мс, то ширина эталонной полосы частот составит $(10 \text{ кГц}/20 \text{ мс})^{1/2} = 700 \text{ Гц}$).

Во всех случаях, если ширина полосы частот, вычисленная по приведенным выше формулам, превышает 1 МГц, следует использовать эталонную полосу частот B_{ref} шириной 1 МГц.

3 Полоса частот измерительной системы и параметры детектора

Полоса частот измерений B_m определяется как полоса частот импульсов приемника, а ее ширина превышает ширину полосы ПЧ B_{if} (иногда называемой полосой частот по разрешению анализаторов спектра). Ширина полосы частот измерений B_m может быть определена с помощью следующего уравнения:

$$B_m = B_{if} \times MBR.$$

Для используемого приемника измерительной системы должен быть определен MBR. Для используемого, как правило, в приемниках серийных анализаторов спектра гауссовского фильтра с полосой ПЧ на уровне -3 дБ коэффициент MBR равен примерно $3/2$.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В некоторых устройствах полоса ПЧ определяется на уровне -6 дБ.

Для получения одной из следующих рекомендуемых полос частот измерительной системы должен быть выбран приемник с соответствующей полосой ПЧ. (В общем случае правила определения полосы частот измерений для радаров с более высокой частотой (см. Приложение 1) применяются для радаров с меньшей частотой с использованием подходящего масштабирования параметров сигнала.)

Ширина полосы частот измерений⁹ $\leq (1/T)$ в случае радаров на фиксированной частоте без импульсного кодирования, где T – длительность импульса (например, при длительности импульсов радара равной 100 мкс, полоса ПЧ измерений должна быть $\leq 1/(100 \text{ мкс}) = 10 \text{ кГц}$).

$\leq (1/t)$ в случае радаров на фиксированной частоте с фазово-импульсным кодированием, где t – длительность импульсного чипа (например, если радар передает импульсы длительностью 260 мкс, каждый из которых состоит из 13 фазокодированных чипов длительностью 20 мкс, полоса ПЧ измерений должна быть $\leq 1/(20 \text{ мкс}) = 50 \text{ кГц}$).

$\leq (B/T)^{1/2}$ в случае РЛС с качанием частоты (ЧМ или линейная ЧМ), где B – диапазон качания частоты на каждом импульсе, а T – длительность импульса (например, если качание частоты радара осуществляется в диапазоне 1250–1251 МГц (ширина спектра равна 10 кГц), а длительность импульса составляет 20 мс, полоса ПЧ измерений должна быть $\leq ((10 \text{ кГц})/(20 \text{ мс}))^{1/2} = \sqrt{0,5} \text{ кГц} \approx 700 \text{ Гц}$).

4 Динамический диапазон измерительной системы

Измерительная система должна быть способна измерять уровни нежелательных излучений по правилам, указанным в Приложении 3 к Регламенту радиосвязи. Для получения полной картины спектра, особенно в области побочных излучений, рекомендуется, чтобы система могла измерять уровни излучения на 10 дБ ниже уровней, указанных в Приложении 3 к Регламенту радиосвязи.

Для достижения высокого уровня достоверности результатов динамический диапазон измерений должен быть значительно шире необходимого диапазона измерений (предельный диапазон (2) на рисунке 2).

Связь между необходимым диапазоном измерений и рекомендуемым динамическим диапазоном измерительной системы отражена на рисунке 2.

⁹ Коррекция, связанная с преобразованием полосы частот измерений к эталонной полосе и полосе РЕР, рассматриваемая в п. 3 Приложения 1, также применима к радарам с большой длиной волны, описанным в Приложении 2.

5 Метод прямых измерений

Метод прямых измерений, описанный ниже, может использоваться для измерения нежелательных (внеполосных и побочных) излучений РЛС с большой длиной волны, в которых возможен простой доступ к основному лучу радара, например если антенна или антенная решетка размещены на земле и поляризованы в вертикальной плоскости. Этот метод был использован для измерения характеристик излучения РЛС с большой длиной волны, работающих на частотах выше 45 МГц и имеющих уровни э.и.и.м. в гигаваттном диапазоне.

5.1 Измерительная аппаратура и программное обеспечение

5.1.1 Антенна

Блок-схема измерительной системы, необходимой для реализации двух методов прямых измерений, приведена на рисунке 11. Первым элементом, который следует рассмотреть, является приемная антенна. Приемная антенна должна иметь широкополосную частотную характеристику по крайней мере не менее измеряемого диапазона частот. Для этого может потребоваться использование противовесов антенны. Выбор усиления обычно не вызывает затруднений, так что приемлемой является простая штыревая антенна с противовесом. Для широкополосных измерений может потребоваться калибровка усиления антенны. Это можно произвести с помощью второй короткой (плохо согласованной) антенны, подающей сигналы в измеритель мощности.

Антенна должна быть расположена в дальнем поле, на практике, например, при частоте 20 МГц это расстояние должно быть более 1 км, хотя измерение спектральной характеристики не показало заметного различия измерений в дальнем и ближнем полях. Антеннами многих радаров с большой длиной волны являются решетки, синтезирующие луч с электронным управлением. В этом случае луч должен осуществлять сканирование или измерительная антенна должна быть позиционирована так, чтобы она оказалась максимально близка к пику основного луча.

Поляризация антенны выбирается для максимизации реакции на сигнал радара.

Для соединения измерительной антенны с измерительной системой может быть использован обычный коаксиальный кабель.

5.1.2 Устройство-консультант по свободным каналам

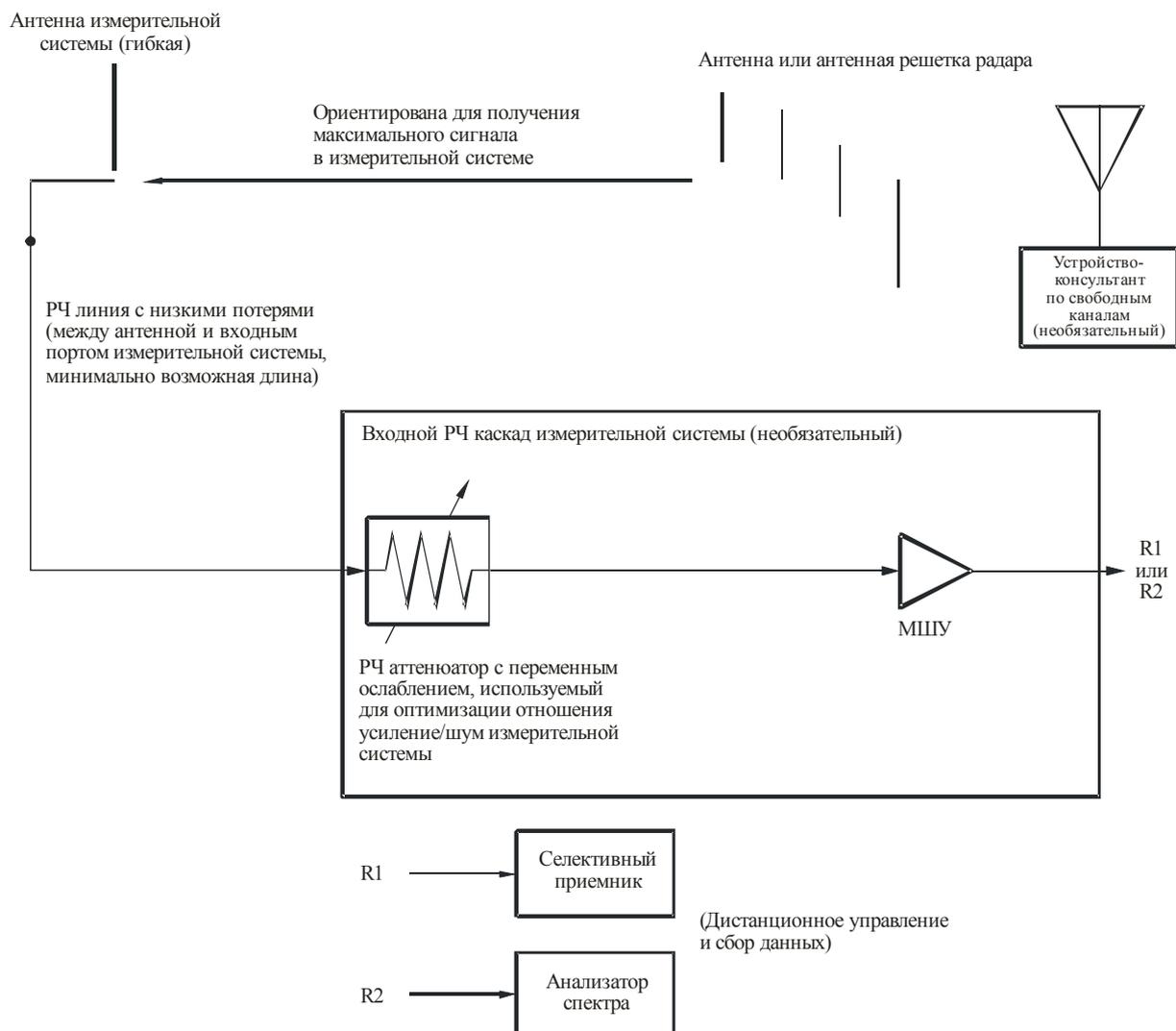
Поскольку сигналы излучения с большой длиной волны распространяются в ионосфере и могут преодолевать большие расстояния, то основная часть спектра, измеренного антенной испытательной системы, будет, вообще говоря, подвергаться воздействию внешних сигналов. Поэтому важно иметь устройство, сообщающее о занятых каналах, предпочтительно такое, которое может собирать данные и осуществлять определенную индикацию мощности сигнала. Для этой цели может использоваться система измерения спектра или независимая приемная система. Данные можно использовать для согласования любых нежелательных излучений, которые, возможно, были вызваны внешними источниками. Эту систему следует также использовать для обнаружения свободного канала для испытательных целей в пределах полосы частот B_{-40} и в области внеполосных излучений.

5.1.3 РЧ входной каскад

РЧ входной каскад выполняет две функции. Во-первых, он защищает входной каскад системы обнаружения благодаря использованию переменного РЧ ослабления. Во-вторых, он выполняет предварительное малошумящее усиление сигнала для обеспечения максимальной чувствительности к излучениям малой мощности. Первым элементом входного каскада является РЧ аттенюатор. Он обеспечивает переменное ослабление (например, в пределах 0–70 дБ) с фиксированным приращением (например, 10 дБ/шаг аттенюатора).

РИСУНОК 11

**Блок-схема системы измерений нежелательных излучений радаров
с помощью метода прямых измерений с ручным управлением**



М.1177-11

5.1.4 Измерительная система с ручным управлением

Измерение с ручным управлением выполняется путем качания частоты по спектру с фиксированным приращением (равным ширине полосы частот измерений). При каждом качании частоты аттенюатор настраивается на поддержание пиковой мощности радара внутри динамического диапазона других элементов измерительной системы (часто ограничивающими элементами являются усилитель входного каскада и логарифмический усилитель анализатора спектра). После правильной настройки РЧ аттенюатора входного каскада при каждом качании частоты производится измерение мощности радара на текущей частоте.

Последним элементом РЧ входного каскада является МШУ. Он устанавливается на трассе распространения сигнала непосредственно после преселектора. Входная характеристика МШУ обеспечивает высокую чувствительность к побочным излучениям радара с малой амплитудой, а его усиление компенсирует коэффициент шума остальных компонентов измерительной системы (например, длину линии передачи и анализатор спектра/выбранный приемник).

Чувствительность и динамический диапазон измерительной системы оптимизируются путем правильного выбора параметров усиления и коэффициента шума МШУ. Желательно минимизировать коэффициент шума и одновременно обеспечить достаточное усиление для всех измерительных цепей, следующих за МШУ (главным образом из-за потерь в РЧ линии, следующей за выходным каскадом, и коэффициента шума цепей анализатора спектра и выбранного приемника). В идеальном случае сумма усиления и коэффициента шума МШУ (который равен избыточному шуму, производимому МШУ с входной нагрузкой 50 Ом) должна быть примерно равна коэффициенту шума остальных компонентов измерительной системы. Предположим, например, что коэффициент шума анализатора спектра равен 25 дБ, а потери в РЧ линии между входным каскадом и анализатором составляют 5 дБ. Значит, МШУ, входящий в состав входного каскада, должен компенсировать общий коэффициент шума, равный 30 дБ. Таким образом, в этом примере сумма усиления и коэффициента шума МШУ должна быть равна примерно 30 дБ. Для такого МШУ можно предложить следующую комбинацию: коэффициент шума, равный 3 дБ, и усиление, равное 27 дБ.

Предполагается, что оставшейся частью РЧ измерительной системы является серийно выпускаемый анализатор спектра или анализатор спектра с преселектором или селективным приемником. Можно использовать любое оборудование, которое позволяет принимать сигналы за пределами диапазона исследуемых частот. Измерения проводились с использованием современных цифровых приемников, которые легко обеспечивают выполнение требований к диапазону частот и динамическому диапазону, в значительной степени устраняя потребность в каком-либо ослаблении или усилении во входном каскаде.

6 Метод косвенных измерений

При использовании косвенного метода измерения выполняются путем подключения к выходу каждого передатчика. Измерительная аппаратура аналогична аппаратуре, используемой при реализации метода прямых измерений. При наличии нескольких передатчиков должна быть зарегистрирована комплексная амплитуда; затем сигналы должны быть объединены с помощью программного обеспечения с учетом весового коэффициента схемы управления лучом и задержек в фидере.

Сбор данных легко осуществляется путем подключения анализатора спектра или приемника к переносному компьютеру через универсальную интерфейсную шину GPIB или эквивалентный интерфейс.
