

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Отчет МСЭ-R SM.2056-1
(06/2014)

Воздушная проверка направленности антенны радиовещательных станций

Серия SM
Управление использованием спектра

Предисловие

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

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

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

Серии Отчетов МСЭ-R

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

Серия	Название
VO	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

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

Электронная публикация
Женева, 2015 г.

© ITU 2015

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

ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2056-1

**Воздушная проверка направленности антенны
радиовещательных станций**

(2005-2014)

1 Резюме

В данном Отчете описываются процедуры измерения, необходимое оборудование и процедуры отчетности для измерений диаграмм направленности антенн при помощи воздушного судна. Данный Отчет не зависит от выбранной воздушной платформы и может использоваться независимо от используемой радиовещательной системы. Однако для конкретных воздушных платформ и конкретных радиовещательных систем даются дополнительные рекомендации и таким образом он может быть приспособлен под любые конкретные требования.

Данный Отчет разделен на три приложения:

- в Приложении 1 представляются различные типы диаграмм направленности антенн, которые можно выделить, и процедуры их измерения. В нем приводится описание оборудования, необходимого для выполнения таких измерений. Это описание является достаточно подробным для создания собственной системы без ограничений в выборе оборудования. Дается описание послеполетного анализа, имеющего важное значение для оценки точности измерения, с последующим указанием стандарта отчетности;
- каждый тип радиовещания и каждый диапазон частот требуют своих собственных настроек и содержат моменты, на которые необходимо обратить особое внимание. Данные вопросы освещаются в Приложении 2;
- в Приложении 3 описываются особые проблемы, возникающие при выборе конкретного типа воздушного судна, и предлагаются возможные решения.

Приложение 1**Воздушная проверка направленности антенны
радиовещательных станций****1 Введение**

В этом Приложении описываются процедуры измерения, необходимое оборудование и процедуры отчетности для измерений диаграмм направленности антенн при помощи воздушного судна. Данное Приложение имеет следующую структуру.

В разделе 2 описываются различные типы диаграмм направленности антенн, которые можно выделить. В разделе 3 приводится общее описание метода измерения. В разделе 4 описываются различные типы измерительных полетов. В разделе 5 описывается оборудование, необходимое для выполнения этих измерений. Это описание является достаточно подробным для создания собственной системы без ограничений в выборе оборудования. В разделе 6 описываются применяемые процедуры измерения. В разделах с 7 по 9 рассматриваются различные вопросы обработки данных, расчета погрешности измерений и отчетности.

Рекомендации, приведенные в данном Приложении, не зависят от выбранного типа воздушного судна и могут применяться независимо от используемой системы радиовещания. В Приложениях 2 и 3 даются дополнительные рекомендации для конкретных воздушных платформ и конкретных систем радиовещания.

2 Типы диаграмм направленности антенн

Диаграмма направленности любой антенны является трехмерной. Измеренные диаграммы направленности антенны, как правило, являются двумерными сечениями такой трехмерной диаграммы. Наиболее распространенными сечениями являются "вертикальная диаграмма направленности антенны" и "горизонтальная диаграмма направленности антенны". Вертикальная диаграмма направленности антенны представляет собой вертикальное сечение диаграммы направленности, проходящее через антенну и определенное азимутальное направление. Горизонтальная диаграмма направленности антенны представляет собой горизонтальное сечение диаграммы направленности антенны, проходящее через антенну и определенный угол места или наклона. См. рисунки 1 и 2. Используемые системы координат описываются в Рекомендации МСЭ-R BS.705.

РИСУНОК 1

Вертикальная диаграмма
направленности антенны

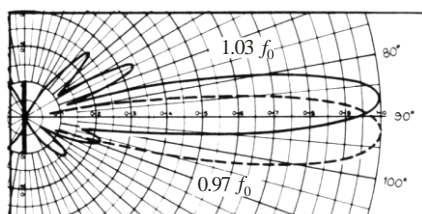
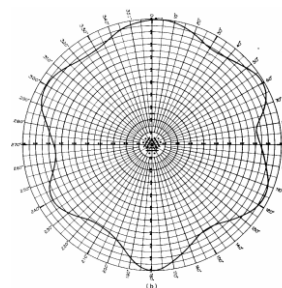


РИСУНОК 2

Горизонтальная диаграмма
направленности антенны

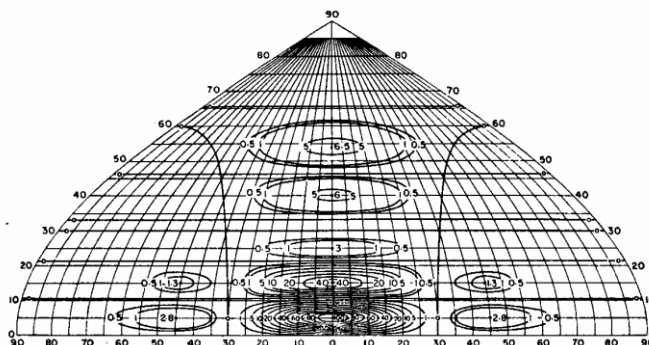


Report SM.2056-01

В некоторых случаях особое внимание уделяется одному конкретному сектору антенны. Для остронаправленных ВЧ-радиовещательных антенн точная форма и положение главного лепестка, а также эффективная излучаемая мощность (Э.И.М.) через этот главный лепесток определяют контуры зоны обслуживания в заданной области и поэтому являются очень важными параметрами. Специальное измерение диаграммы направленности антенны может обеспечить составление диаграммы этой части направленности антенны. Пример такой диаграммы направленности антенны, а именно синусоидальной проекции Сансона-Флемстида, приведен на рисунке 3.

РИСУНОК 3

Диаграмма направленности главного лепестка антенны



Report SM.2056-03

Измерения диаграммы направленности антенны могут быть повторены для различных азимутов или различных углов места для получения дополнительной информации по всей трехмерной диаграмме направленности. Эти азимуты или углы места могут быть специально выбраны, основываясь на геометрии антенны, моделировании или опыте предыдущих измерительных кампаний.

Измерение любых из данных типов диаграмм направленности антенны требует своих собственных наборов измерительных полетов, но процедура измерения практически, если не полностью, одинакова.

3 Метод измерения

Измерение диаграммы направленности антенны, по существу, является серией измерений напряженности поля, каждое из которых производится на точно известном расстоянии от измеряемой антенны. Имея эти два значения можно рассчитать абсолютное значение эквивалентной изотропно излучаемой мощности (Э.И.И.М.). Если производится измерение Э.И.И.М. в ряде точек, расположенных вдоль окружности вокруг антенны, получается горизонтальная диаграмма направленности антенны. По желанию могут быть выполнены измерения других сечений диаграммы направленности. Ниже приводится формула для расчета абсолютного значения Э.И.И.М. в линейной форме:

$$P_{\text{Э.И.И.М.}} = \frac{P_{RX} \cdot R^2}{g_{RX}} \cdot \left(\frac{4 \pi f}{c} \right)^2, \quad (1)$$

где:

- $P_{\text{Э.И.И.М.}}$: мощность относительно изотропного излучателя (Вт);
- P_{RX} : мощность на входе приемника (Вт);
- R : расстояние между приемной и передающей антеннами (м);
- g_{RX} : усиление (линейное значение) приемной антенны относительно изотропного излучателя;
- f : частота (Гц);
- c : скорость света (м/с).

Особое внимание необходимо уделить одновременности измерения положения и P_{RX} . Если это условие не соблюдено, результирующее значение Э.И.И.М. будет неверным. В этой формуле значения $P_{\text{Э.И.И.М.}}$ и g_{RX} приведены относительно изотропного излучателя. Дополнительные потери, такие как потери в кабеле, потери из-за юстировки антенны или поляризационные потери, должны быть учтены в значении G_{RX} . Как правило, более практичным является использование логарифмической версии той же формулы:

$$P_{\text{Э.И.И.М.}} = P_{RX} + 20 \log (R) - G_{RX} + 20 \log (f) + 20 \log (4\pi / c). \quad (2)$$

В формуле (2) $P_{\text{Э.И.И.М.}}$ и P_{RX} выражены в дБВт, а G_{RX} – в дБи.

В зависимости от применения в радиовещании и используемой радиовещательной полосы частот стандартная эталонная антенна может отличаться от изотропного излучателя, являясь, например, полуволновым диполем или коротким несимметричным вибратором. Для расчета эффективной излучаемой мощности (э.и.м.) (для эталонного полуволнового диполя) может использоваться следующая формула:

$$P_{\text{э.и.м.}} = P_{\text{Э.И.И.М.}} - 2,15 \text{ дБ}, \quad (3)$$

поскольку усиление антенны для полуволнового диполя составляет 2,15 дБи.

4 Типы измерительных полетов

Тип выполняемых измерительных полетов полностью зависит от местоположения антенны и используемого воздушного судна. Например, для измерения диаграммы направленности радиовещательной антенны в диапазоне ОВЧ при помощи вертолета необходимо использовать другие подходы, чем используются для измерения диаграммы направленности антенных решеток на средних волнах при помощи самолета. В данном разделе описаны различные типы измерительных полетов и их применение.

4.1 Полет вдоль трассы распространения

Для определения оптимального расстояния по проведению измерений может быть выполнен полет вдоль трассы распространения. Это полет по прямой линии в направлении передающей антенны точно на высоте передающей антенны. В этом случае угловое положение измерительной антенны, видимое со стороны передающей антенны, остается неизменным, следовательно, передаваемая в этом направлении Э.И.М. является постоянной. При отсутствии отраженных сигналов измеренный во время полета вдоль трассы распространения уровень Э.И.М. будет также постоянным. При наличии отражений от земли или рассеяния сигналов зданиями их влияние будет показано в виде отклонений от прямой линии, как показано на рисунке 4.



Рекомендуемым направлением измерения для полета вдоль трассы распространения является направление на главный лепесток диаграммы направленности антенны. Несколько полетов вдоль трассы распространения рекомендуется для антенн с несколькими направлениями излучения и в случаях, когда различаются наземные условия и, следовательно, отражения от земли.

Дополнительно к теоретическому графику на рисунке 4 реальные результаты измерения показаны на рисунке 5. Этот график построен для передатчика ЧМ-радиовещания в диапазоне ОВЧ мощностью 50 кВт. Передающая антенна состояла из решетки вертикально поляризованных логопериодических дипольных антенн, установленных на мачте высотой около 150 м над уровнем земли. Окружность показывает расстояние, которое было выбрано для последующего полета по кругу.



По результатам полета вдоль трассы распространения выбирается оптимальное расстояние для последующих измерений. Оптимальным расстоянием является расстояние, для которого:

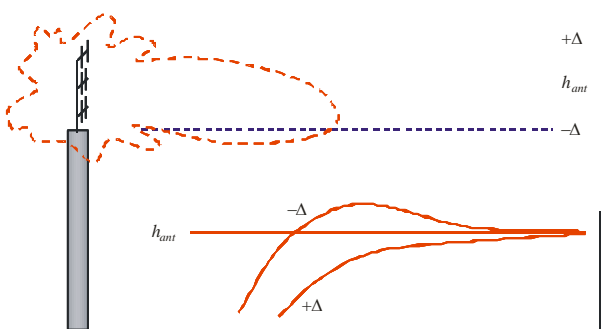
- амплитуда отражений является наименьшей; и
- минимальное и максимальное значения расположены наиболее близко друг к другу.

Первый критерий является очевидным, а второй может потребовать объяснения. Если минимальное и максимальное значения, вызванные отражениями от земли, находятся далеко друг от друга, а поверхность земли является плоской и однородной, то, например, полный полет по кругу может быть произведен на расстоянии, когда наблюдается минимальное или максимальное значение. Это может привести к наибольшей погрешности измерений, тогда как данная проблема может показывать наименьшую погрешность в виде колебаний результата измерений. Поэтому необходимо избегать появления такой ситуации. В показанном примере оптимальное расстояние проведения измерений будет составлять около 1300 м. Это расстояние помечено окружностью на рисунке 5.

Если высота, на которой осуществляется полет вдоль трассы распространения, отличается от фактической высоты антенны, график будет понижаться по мере приближения воздушного судна к антенне. Если полет проходит слишком низко и проводятся измерения передающей антенны с наклоном диаграммы книзу, то графики могут демонстрировать незначительное повышение перед снижением значения. Этот эффект показан на рисунке 6.

РИСУНОК 6

Влияние неправильной высоты при полете вдоль трассы распространения



Report SM.2056-06

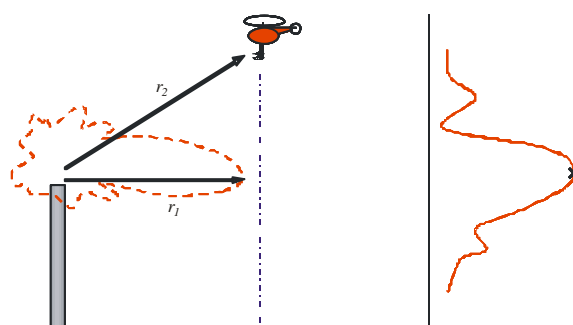
Перед выполнением полета вдоль трассы распространения дисплей помогает летчику, показывая текущее положение воздушного судна относительно передающей антенны, а также требуемое начальное положение полета вдоль трассы распространения. Это положение может быть описано при помощи требуемого азимутального угла относительно передающей антенны и требуемой высоты. Во время полета вдоль трассы распространения дисплей помогает летчику, показывая смещение в метрах от желаемой траектории полета. Полет вдоль трассы распространения проще осуществлять на воздушном судне, обладающем хорошей управляемостью и маневренностью на низких скоростях полета, например на вертолете. Вертолет может лететь по прямой линии до расстояния 200 м от мачты, а затем остановиться и полететь назад. Это невозможно для других типов воздушных судов. Всегда необходимо соблюдать минимальное расстояние до передающих антенн, чтобы избежать чрезмерного электромагнитного облучения. Если передающая антенна установлена непосредственно на поверхности земли, как в случае с большинством длинноволновых, средневолновых и коротковолновых антенн, полет вдоль трассы распространения невозможен.

4.2 Вертикальный полет

Для получения вертикальной диаграммы направленности радиовещательной антенны в конкретном азимутальном направлении может выполняться вертикальный полет. Измерение вертикальной диаграммы направленности антенны может быть необходимо для определения оптимальной высоты полета для измерения горизонтальной диаграммы направленности антенны, как показано на рисунке 7.

FIGURE 7

Вертикальный полет



Report SM.2056-07

Для выполнения вертикального полета летчик сначала перемещается в заданном азимутальном направлении, а затем снижается до необходимой начальной высоты. Дисплей оказывает помощь летчику, показывая текущее положение воздушного судна относительно передающей антенны, а также необходимое начальное положение для вертикального полета. После этого летчик начинает подъем вдоль прямой вертикальной линии, стараясь удерживать горизонтальное положение максимально точно. Если используется вертолет, максимальная устойчивость достигается, когда полет совершается с малой высоты до более высокой на полном газе.

Во время вертикального полета дисплей помогает летчику, показывая смещение в метрах от желаемой траектории полета. Это может быть достигнуто путем отображения воздушного судна в виде точки на круговом экране. Центр окружности представляет собой желаемое горизонтальное положение, а сама окружность показывает максимально допустимое горизонтальное смещение. Во время полета вверх летчик должен удерживать точку в пределах окружности. Круговой экран может быть связан с компасом, чтобы соотносить его ориентацию с положением воздушного судна. Это упрощает управление, поскольку направление носа воздушного судна зависит от ветра.

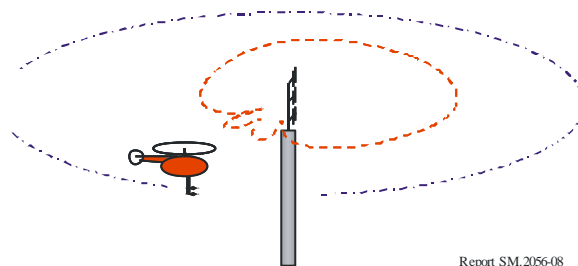
Если воздушное судно для выполнения вертикальных полетов отсутствует, вертикальная диаграмма таким путем не может быть построена. Поэтому она должна быть приблизительно составлена при помощи интерполирования точек измерения последующих горизонтальных полетов.

Во время вертикального полета необходимо учитывать два поправочных фактора – компенсацию разницы усиления вертикальной диаграммы направленности измерительной антенны и компенсацию разницы в расстоянии (r_1 и r_2 на рисунке 7).

4.3 Полет по кругу

Для получения горизонтальной диаграммы направленности радиовещательной антенны летчик летает по кругу вокруг передающей антенны, корректируя свою высоту и расстояние до передающей антенны до получения желаемых значений. После этого начинается измерение, и летчик продолжает полет по кругу вокруг мачты до завершения измерений. Во время этого процесса летчик руководствуется информацией на дисплее. Дисплей отображает в реальном времени фактическое положение воздушного судна относительно идеальной траектории вокруг передающей антенны. Во время полета по кругу дисплей помогает летчику, показывая смещение в метрах от желаемой траектории полета (расстояние и высоту). Как правило, необходимо пролететь часть окружности для выхода на необходимую траекторию полета, поэтому задавать определенный начальный азимут нецелесообразно. В большинстве случаев летчик предпочитает видеть объект, вокруг которого он или она совершает облет, поэтому направление облета по часовой или против часовой стрелки диктуется расположением кабины воздушного судна. Программное обеспечение и антенная система должны быть приспособлены для этого. Наилучшая устойчивость получается, когда воздушное судно совершает облет с равномерной и не слишком низкой скоростью. По мере облета воздушного судна вокруг антенны относительное направление ветра меняется в соответствии с азимутальным углом, в результате чего в процессе облета на антенну указывают различные части воздушного судна. В связи с этим в большинстве случаев необходимо управлять антенной во время полета.

РИСУНОК 8
Полет по кругу



4.4 Другие типы полетов

Измерения диаграмм направленности вокруг наземных антенн, например вокруг многовibratorных ВЧ-антенн и средневолновых мачт или решеток, требуют другого подхода, чем телевизионные или радиовещательные передатчики, размещенные на мачте. Например, полеты по кругу на высотах, отличных от высоты главного лепестка, могут дать измерительные точки, необходимые для построения трехмерной диаграммы направленности, а прямые полеты на низких высотах вдоль азимута главного лепестка могут дать представление о вертикальной диаграмме направленности антенны.

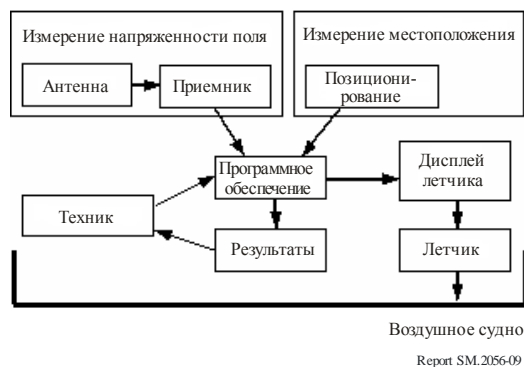
Если точно известно трехмерное положение точки измерения и рассчитана Э.И.М. для данной точки измерения, нет ограничений на применяемую фактическую траекторию полета при условии, что инженер, обрабатывающий данные измерения, обладает глубокими знаниями предмета исследований.

5 Измерительное оборудование

Как показано в п. 3, Э.И.М. можно измерить посредством точного измерения местоположения и напряженности поля. Местоположение может быть измерено при помощи устройства позиционирования, которое предоставляет быструю и точную информацию о трехмерном положении объекта. Напряженность поля может быть измерена при использовании антенны, откалиброванной в свободном пространстве, и откалиброванного измерительного приемника. Данные о местоположении и напряженности поля записываются и обрабатываются компьютером. Компьютер рассчитывает уровни Э.И.М. и местоположение точки измерения относительно исследуемой антенны и отображает результаты для технического специалиста в соответствующей форме. Технический специалист управляет измерительной системой и принимает решения на основании результатов, отображаемых на экране. Программное обеспечение также выдает информацию для летчика, помогая ему ориентироваться вокруг антенны. Летчик отвечает за сам полет и связанные с ним вопросы безопасности. Упрощенное схематическое представление типовой измерительной системы показано на рисунке 9, подсистемы которой будут рассмотрены в следующих разделах.

РИСУНОК 9

Схематическое представление измерительной системы проверки на борту воздушного судна диаграмм направленности антенн



5.1 Оборудование для определения местоположения

Поскольку расстояние, используемое в формуле, представляет собой расстояние в трехмерном пространстве, необходимо знать положение измерительной точки и передающей антенны вдоль трех осей, например широту, долготу и высоту. Следует также учитывать расстояние между трехмерным положением измерительной антенны и устройством определения местоположения.

Применяемая система определения местоположения должна в любом случае удовлетворять критериям точности и частоты обновления. Точность зависит от применения, но, как правило, должна составлять ± 1 м во всех направлениях. Требования к частоте обновления можно найти в конце этого раздела и в п. 5.5 данного Приложения. Могут применяться гибридные системы определения местоположения, использующие эталонные маяки. Зоны покрытия таких маяков могут ограничивать гибкость применения. Точность определения местоположения задает точность расчетного расстояния до испытуемой антенны. В свою очередь это определяет точность рассчитываемого значения Э.И.М. и точность относительного положения. Измерения вблизи испытуемой антенны требуют более высокой точности позиционирования, чем измерения на больших расстояниях. Оптимальное расстояние до точки измерений зависит от длины волны, размеров испытуемой антенны и окружающих условий, которые вызывают отражения сигналов. Требуемая точность определения местоположения составляет около 2 м.

Частота обновления устройства позиционирования должна быть достаточной для создания необходимого количества точек измерения вдоль траектории полета. Это зависит от угловой путевой скорости воздушного судна. Также частота обновления данных на дисплее летчика должна быть близка к обновлению в реальном времени. Абсолютным минимумом является частота обновления 2 Гц, более предпочтительной является частота 10 Гц и более.

5.2 Измерительная антенна

5.2.1 Коэффициент усиления

Для измерения абсолютного значения напряженности поля антенна должна быть откалибрована в свободном пространстве. Усиление должно указываться относительно соответствующей эталонной антенны. Точность калибровки антенны является одним из основных факторов, влияющих на общую точность измерения. Точность калибровки от 0,5 до 1 дБ является вполне достижимой и целесообразной.

Текущее значение усиления антенны не является критичным, если оно точно известно. Однако усиление антенны ниже -20 дБи приведет к нежелательному росту влияния антенного кабеля. А коэффициент направленного действия выше 6 дБи приведет к снижению точности в связи с погрешностями юстировки.

5.2.2 Диаграмма направленности измерительной антенны

Измерительная антенна демонстрирует откалиброванную величину усиления только в случае, когда она точно наведена на испытываемую антенну. Добиться точной настройки измерительной антенны во время полета достаточно сложно, поэтому предпочтительно использовать измерительную антенну, которая имеет по возможности минимальные колебания усиления вблизи главного лепестка. При этом процедура настройки становится менее критичной, повышая точность измерения.

Если полет производится на высоте, отличной от высоты испытываемой антенны, например во время вертикального полета, усиление измерительной антенны будет меняться в зависимости от угла приходящей волны. Если вертикальная диаграмма направленности измерительной антенны известна, можно осуществить ее компенсацию в измерительном программном обеспечении. Чтобы можно было осуществить эту операцию, измерительная антенна должна иметь сглаженную диаграмму направленности.

Нет необходимости проектировать измерительную антенну, которая имеет высокий коэффициент обратного излучения. Исследуемая антенна находится относительно близко от полезной антенны, а другие радиовещательные передатчики, работающие на той же частоте, располагаются сравнительно далеко. Поскольку уровень сигнала обратно пропорционален расстоянию, полезный сигнал в несколько раз сильнее сигнала других радиовещательных передатчиков, принимаемого от других радиовещательных мачт. Как правило, нет необходимости в дополнительном их подавлении, используя направленные свойства измерительной антенны.

5.2.3 Юстировка измерительной антенны

В большинстве случаев измерительная антенна обладает направленным действием. Поэтому во время полета измерительная антенна должна быть как можно более точно наведена на испытываемую антенну. Это можно осуществить при помощи некоторых механических или электромеханических поворотных устройств, управляемых техническим специалистом. В любом случае необходима какая-то индикация текущего положения антенны, чтобы можно было приблизительно навести измерительную антенну на испытываемую. Для более точной регулировки положения необходимо использование какого-либо прицельного приспособления. Хорошим и экономичным решением является небольшая камера, установленная на антенне или около нее и ориентированная в том же направлении. Необходимо обеспечить определенную степень фильтрации солнечного света, чтобы избежать перегрузки микросхемы камеры.

Отсутствие каких-либо средств ориентирования измерительной антенны в направлении испытываемой антенны приведет к получению неправильных результатов. Стабилизация воздушного судна в соответствии с заданным углом относительно испытываемой антенны, как правило, неосуществима, поскольку направление ветра приведет к отклонению траектории полета. Юстировка в вертикальной плоскости в большинстве случаев невозможна.

При проведении анализа на предмет неопределенности измерения необходимо учитывать погрешность юстировки и результирующую погрешность измерения.

5.2.4 Подавление отражений от земной поверхности

Для получения точной диаграммы направленности антенны следует измерять только прямые волны, идущие от передающей антенны к измерительной антенне. Однако любой объект в пределах видимости обеих антенн может стать причиной отражения передаваемых волн. Следует иметь в виду, что если не принять никаких мер, то будут измеряться и прямые и отраженные волны, создавая своего рода нежелательную "модуляцию" на измеряемой и представляемой диаграмме направленности антенны.

Эта проблема в значительной степени зависит от вертикальной направленности передающей и приемной антенн, а также от высоты передающей антенны относительно расстояния до места измерения. Например, ЧМ-антенны с малым усилением в диапазоне ОВЧ на невысоких объектах представляют гораздо более серьезную проблему в этом отношении, чем телевизионные УВЧ-станции с использованием высоких опор и с антеннами, обладающими большим усилением. Также должно учитываться отражение принимаемого сигнала от элементов воздушного судна. Поскольку одним из основных факторов, влияющих на погрешность измерения, являются отражения от земли, этой составляющей уделяется особое внимание.

Отвечающая всем требованиям конструкция измерительной антенны может сделать измерительную систему менее подверженной влиянию отражений от земли. Этого можно добиться путем создания антенны, которая подавляет направления, с которых ожидается поступление отраженных волн, и усиливает прямые волны. Практический пример показан на рисунках 10 и 11.

РИСУНОК 10
Фактическое измерение
при помощи
простой измерительной антенны

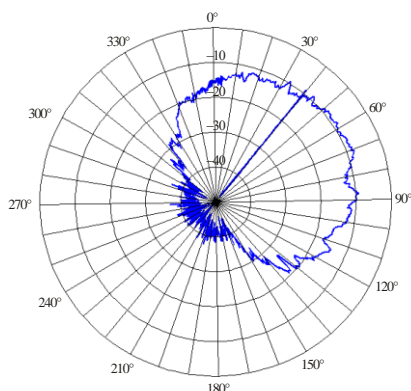
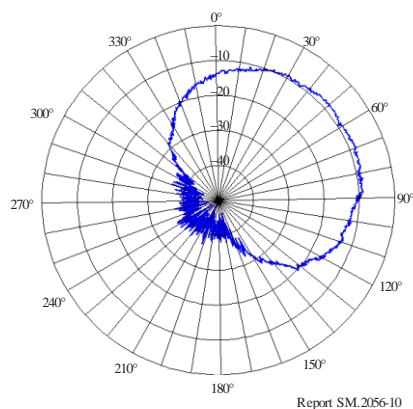


РИСУНОК 11
Аналогичное измерение
с применением
специально спроектированной
измерительной антенны



Report SM.2056-10

В этом примере было дважды выполнено измерение для ЧМ-радиовещательной антенны в диапазоне ОВЧ – сначала при помощи простой измерительной антенны, а затем, повторно, при помощи специально спроектированной антенны для проверки на борту воздушного судна диаграмм направленности. Отражения показаны в виде "модуляций" на диаграмме первого измерения. Преимущество второй специально спроектированной измерительной антенны очевидно.

Другим способом ослабления отраженных сигналов может являться развертывание нескольких измерительных антенн с несколькими приемниками и применение программного обеспечения DSP. Это программное обеспечение может использовать, например, алгоритм MUSIC для выделения только прямого сигнала из суммы отраженного и прямого сигналов. Какой бы метод не использовался для исключения отраженных сигналов, должны быть приняты меры, гарантирующие, что воспроизводимый уровень сигнала все еще точно представляет уровень сигнала прямой волны.

В некоторых случаях для оценки влияния отражений от земли может использоваться моделирование. Такая модель должна учитывать высоту измерения, расстояние до места измерения, высоту испытуемой антенны, предполагаемую вертикальную диаграмму направленности антенны, известную вертикальную диаграмму направленности приемной антенны и реалистичную модель земной поверхности с фактическими параметрами. Используя эти данные, можно получить хорошее представление о специфических трудностях, которые могут возникнуть в конкретной ситуации проведения измерений. Однако моделирование никогда не сможет заменить реальные измерения.

5.2.5 Поляризация

Поляризацию измерительной антенны необходимо адаптировать к поляризации испытуемой антенны. На частотах ОВЧ и УВЧ нелинейные поляризованные антенны находят широкое применение. Для таких антенн текущая поляризация зависит от положения относительно антенны. Поэтому предпочтительно измерять поляризацию независимо. Для этого имеется два пути:

- использование двух измерительных антенн с перпендикулярными поляризациями и двух измерительных приемников. Оба приемника синхронизированы. Суммирование значений мощности, измеренных каждым приемником, даст значение общей принятой мощности, независимой от поляризации переданного сигнала. При такой конфигурации системы возможно построить диаграммы горизонтальной и вертикальной плоскостей поляризации, а также комбинированной диаграммы направленности антенны, не зависящей от поляризации;

- использование одного приемника и двух одинаковых измерительных антенн. Приемник переключается между двумя антеннами, а среднеквадратичный детектор приемника суммирует мощность обеих трасс. Это малозатратный метод.

При использовании последнего метода каждая плоскость поляризации измеряется в течение 50% времени измерения, а конечный результат – ровно на 3 дБ меньше фактического значения, см. рисунок 12. Время переключения и время измерения должны выбираться с учетом параметров модуляции измеряемого сигнала и полосы пропускания приемника. При надлежащем проектировании системы данный метод может обладать такой же точностью, что и первый метод.



Когда для одного периода переключения антенны $p_{\text{верт}} = \frac{\sqrt{\sum_0^T a_k^2}}{z_0}$ и $p_{\text{гориз}} = \frac{\sqrt{\sum_0^T b_k^2}}{z_0}$,

тогда:

$$P_{RX} = \frac{\sqrt{\sum_0^{T/2} a_k^2 + \sum_{T/2}^T b_k^2}}{z_0} \approx \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\sum_0^T a_k^2}}{z_0} + \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\sum_0^T b_k^2}}{z_0} \approx \frac{1}{2} (P_{\text{верт}} + P_{\text{гориз}}),$$

где (линейные значения):

- z_0 : полное сопротивление системы;
- $P_{\text{верт}}$: среднеквадратичный уровень входной мощности от вертикально поляризованной антенны;
- $P_{\text{гориз}}$: среднеквадратичный уровень входной мощности от горизонтально поляризованной антенны;
- P_{RX} : мощность, измеренная приемником, использующим среднеквадратичный детектор;
- a_n : амплитуда напряжения одного замера от вертикальной антенны;
- b_n : амплитуда напряжения одного замера от горизонтальной антенны;
- T : период переключения антенны.

5.2.6 Размеры

Ветровая нагрузка на антенну пропорциональна эффективной поверхности антенны и скорости воздушного судна в процессе измерения. Поэтому допустимые размеры и вес измерительной антенны в значительной мере зависят от типа применяемого воздушного судна и индивидуальной конструкции крепления антенны на данном воздушном судне. Например, если антенна закреплена на конце троса, тянущегося за самолетом, ветровая нагрузка на трос должна быть небольшой, чтобы предотвратить сваливание самолета из-за воздушного сопротивления троса. А если антенна закреплена на антенной мачте, выступающей снизу вертолета, антенна не должна попасть в хвостовой винт при разрушении мачты. Максимально допустимый вес также зависит от способа монтажа. Например, в случае выдвигной мачты слишком тяжелая антенна может препятствовать правильному выдвиганию такой мачты.

5.2.7 Безопасность

Поскольку антенна монтируется снаружи воздушного судна, необходимо получить сертификат безопасности от авиационной регулирующей организации. При оценке безопасности этой организацией антенна и крепеж считаются единым устройством. Зачастую существует конфликт между оптимальной электрической и оптимальной механической конструкцией антенны. Поэтому при проектировании данной антенны целесообразно проконсультироваться со специалистами по конструированию воздушных судов.

5.3 Приемник

В качестве приемника, используемого в таких условиях, может применяться обычный измерительный приемник, однако целесообразно использовать приемник, который имеет малый вес и устойчив к воздействию ударов и вибраций. Некоторые современные приемники используют механические жесткие диски для хранения данных. При использовании этого типа приемников лучше заменить такие дисковые накопители приемников на твердотельные накопители.

5.3.1 Динамический диапазон

Динамический диапазон приемника должен быть достаточно большим. Прежде всего входные каскады приемника не должны быть перегружены всеми видами сигналов (не только полезными сигналами) в пределах полосы пропускания этих каскадов. Общая мощность таких сигналов определяет величину ослабления, которая требуется на входе приемника. Поскольку мощность принимаемых сигналов растет с уменьшением расстояния, аттенюатор должен быть настроен на минимальное планируемое расстояние. Не используйте автоматические аттенюаторы, поскольку гистерезис может, помимо прочего, привести к блокированию приемника.

При такой настройке аттенюатора должен остаться достаточный динамический диапазон для точного измерения диаграммы направленности полезной антенны. При измерении горизонтальной диаграммы направленности антенны колебания Э.И.М. могут вполне вероятно превышать 30 дБ. При изменении расстояния колебания Э.И.М. увеличиваются соответствующим образом. Для точного измерения наименьшего уровня принимаемого сигнала уровень шумов приемника должен быть на 10–20 дБ ниже уровня такого сигнала.

5.3.2 Избирательность

Избирательность приемника должна быть такой, чтобы мощность измеряемого сигнала полностью передавалась детектору, в то время как сигналы по соседним каналам в достаточной степени подавлялись. При выборе слишком узкополосного фильтра модуляция полезного радиовещательного передатчика приведет к колебаниям сигнала, что снизит точность измерений. При выборе слишком широкополосного фильтра к мощности сигналов в полезном канале будет добавляться мощность сигналов в соседних каналах при их наличии.

Подавление сигналов от передатчиков соседних каналов на одной и той же мачте становится сложным в случаях, когда радиовещательная антенна использует меньший уровень Э.И.М. по сравнению с соседними каналами, а обе антенны имеют остронаправленную диаграмму направленности. В этом случае правильное планирование полетов и настроек аттенюатора является

критически важным. Для получения хороших результатов ограничивающими факторами являются динамический диапазон и качество фильтров приемника.

Приемник должен быть оборудован детектором, который соответствует модуляции радиовещательной станции, чтобы обеспечивалось правильное измерение плотности мощности сигнала. Предпочтительный тип детектора и соответствующие настройки приемника описываются в Приложении 2. При наличии только типового детектора данный вид детектора может быть эмулирован в измерительном программном обеспечении при условии достаточно высокой скорости измерения приемника и достаточно быстрого действия измерительного компьютера.

5.4 Программное обеспечение и вычислительное оборудование

Наиболее практичным способом управления оборудованием является применение небольшого дистанционного устройства управления, например ноутбука или планшета. Это устройство соединяется с остальным оборудованием при помощи одного кабельного жгута. Таким способом система оптимизируется не под одного оператора, а все операторы могут наиболее комфортно разместиться на борту воздушного судна. Поскольку на большинстве воздушных судов внутреннее пространство ограничено, это устройство должно быть небольшим. При наличии такой возможности использование встроенного компьютера в составе измерительного приемника позволяет не увеличить общий вес и уменьшить количество интерфейсных кабелей, а также ограничивает уровни электромагнитного излучения от компьютера.

Использование мыши или трекбола является непрактичным на борту воздушного судна, поэтому все функции программного обеспечения должны быть доступны с клавиатуры. Одним из способов обеспечения такой возможности является использование "быстрых" клавиш и функциональных кнопок. Необходимо тщательно подобрать цвета пользовательского интерфейса, а также оптимизировать цвета экрана, чтобы обеспечить чтение информации как при дневном свете, так и в темноте. Нельзя отображать на одном экране несколько записей с самописцев, так как это может привести к путанице. Отображайте только исходные данные, поскольку обработанные или сглаженные данные осложняют оценку качества измерения.

Программное обеспечение должно содержать всю информацию, необходимую для расчета Э.И.М. в процессе полета и отображения относительного местоположения воздушного судна, как, например, местоположение мачты, высоту антенны, предполагаемую диаграмму направленности и Э.И.М. антенны, частоту и т. д. Должны быть сохранены в качестве предварительно установленных заранее запланированные траектории полета, а также оптимальные значения высоты и расстояния. Также можно сохранить прочую информацию для оказания помощи техническому специалисту, например частоту, мощность высоту антенн и других передатчиков на той же мачте. Практическая ситуация всегда немного отличается от планируемой, поэтому должна быть предусмотрена возможность удобного изменения параметров во время полета.

Программное обеспечение должно включать автоматическую проверку целостности, которая проверяет общие настройки и осуществляет быструю калибровку оборудования. Такая проверка целостности может запускаться вручную, а также выполняться автоматически перед каждым измерением.

5.5 Дисплей летчика

Дисплей летчика представляет собой небольшой экран, расположенный перед летчиком. Перед началом измерений он указывает летчику положение, с которого должно начаться измерение. В процессе выполнения измерения он предоставляет информацию в реальном времени об отклонениях от планируемой траектории полета. Для различных типов измерений могут применяться различные варианты размещения компонентов на экране.

Небольшие экраны, используемые в автомобильной промышленности, являются достаточно надежными, а интерфейсные кабели могут быть более длинными, чем стандартные компьютерные интерфейсные кабели, такие как VGA.

РИСУНОК 13

Дисплей летчика и компоновка изображения на экране



Report SM.2056-13

В показанном примере компоновки экрана на рисунке 13 синяя линия на верхней горизонтальной панели отображает текущее горизонтальное положение воздушного судна. Синяя линия на вертикальной панели отображает текущее вертикальное положение воздушного судна. Зеленые линии отображают максимально допустимые отклонения от идеальной линии, показанной красным цветом. Нижняя горизонтальная панель является увеличенным изображением участка между зелеными линиями верхней панели. Эксперименты показали, что для обеспечения плавного полета летчику необходимо предоставлять данные с частотой обновления 5–10 Гц.

5.6 Технические специалисты

Измерения должны производиться двумя техническими специалистами и летчиком. Один технический специалист осуществляет измерения, а второй следит за нацеливанием и выдвиганием антенны, а также отвечает за общие вопросы, например за связь с землей. Технические специалисты должны быть способны анализировать данные в процессе измерений и адаптировать план измерений в соответствии с текущей ситуацией. Поэтому они должны обладать обширными знаниями в области антенн и измерения их параметров. Также необходимо обладать подробными знаниями об исследуемых системах радиовещания. Поскольку данный тип измерений довольно дорогостоящий и связан с определенными трудностями, технические специалисты должны быть способны работать в команде, чтобы своевременно принимать необходимые решения.

5.7 Летчик

Летчик должен выполнять полет в пределах предварительно заданной траектории, но точное поддержание заданной траектории не является самым важным фактором. Не менее важным является поддержание устойчивого полета. Летчик должен обладать достаточными знаниями в области проводимых измерений, чтобы предложить альтернативные траектории полета, если с выбранными траекториями возникают практические трудности или затруднения в плане обеспечения безопасности.

5.8 Воздушное судно

Выбор конкретного воздушного судна зависит от многих факторов, а также создает конкретные возможности и накладывает ограничения на измерительную систему и измерительные полеты. Поэтому рекомендуется проектировать измерительную систему под тот тип воздушного судна, который будет использоваться. Дополнительная информация об этих различиях между воздушными судами приведена в Приложении 3.

6 Процедуры измерений

В данном разделе описываются процедуры измерения, которые должны последовательно соблюдаться для получения высококачественных результатов измерений диаграмм направленности антенны на борту воздушного судна.

6.1 Обследование радиостанции

Перед осуществлением и даже планированием какого-либо измерительного полета необходимо собрать большой объем информации о намеченной для проверки радиовещательной станции.

- Должно быть точно известно трехмерное положение фазового центра радиовещательных антенн. Все действия по ориентации производятся относительно данного местоположения, от которого зависит также и расстояние, используемое в расчетах Э.И.М. Как горизонтальное положение, так и высота должны определяться при помощи устройства определения местоположения самолета, чтобы свести к минимуму различия в калибровке. Вместо расположения антенной мачты должен быть измерен фазовый центр антенны. Нельзя полагаться на значения высоты и местоположения антенны, указанные на бумаге; эти значения должны обязательно проверяться путем измерений.
- Заранее должны быть известны предельные уровни диаграммы направленности антенны (выраженные в Э.И.М.) в соответствии с лицензией радиовещательной компании. Они могут быть включены в измерительное программное обеспечение для оказания помощи техническим специалистам.
- Тип радиовещательной антенны, ее ориентация и размеры необходимы для оценки влияния отражений от земли, а также для планирования измерительных полетов.
- Тип земной поверхности и ее структура должны быть известны для учета препятствий и возможных проблем с отражениями от земли.
- Уровни РЧ-мощности и диаграммы направленности антенн других передатчиков на той же станции должны быть известны для оценки ухудшения результатов при измерении диаграммы направленности антенны из-за воздействия сигналов соседних каналов, а также для расчета оптимальных настроек аттенюатора приемника. Также необходимо рассчитать минимально допустимое расстояние до мачты, чтобы предотвратить чрезмерное облучение персонала и воздушного судна электромагнитными полями.
- Должна быть проверена занимаемая полоса частот и форма спектра полезного передатчика, чтобы убедиться в правильной настройке фильтров приемника. Должна быть проверена занимаемая полоса передатчиков соседних каналов, чтобы обеспечить достаточную защиту.

Поскольку большая часть этой информации собирается в радиовещательной станции, данный этап сбора данных называется *обследованием радиостанции*.

6.2 Планирование измерений

Для получения наилучших результатов кампания по проведению измерений на борту воздушного судна должна быть хорошо спланирована. Зачастую необходимо последовательное проведение измерений нескольких радиовещательных станций, и во многих случаях в одном и том же месте необходимо измерить диаграмму направленности нескольких антенн. Надлежащее планирование позволяет объединять такие измерения эффективным образом.

Планирование измерений включает расчет времени полета к радиовещательным станциям и между ними, а также времени, которое необходимо на выполнение всех требуемых полетов. Необходимые типы полетов, оптимальные высоты полетов, расстояния и траектории могут быть определены на основании информации, собранной в процессе обследования станции. Как правило, но не всегда, можно провести измерение нескольких диаграмм направленности, когда несколько передатчиков используют одну и ту же антенну. Вопросы дозаправки, места базирования и другие вопросы, связанные с полетом, должны быть обсуждены с летчиком, который отвечает за безопасность полета.

6.3 Предполетная проверка

Поскольку полетное время является наиболее дорогостоящей компонентой времени проведения измерений, все оборудование должно быть тщательно проверено после его установки на воздушное судно и перед взлетом. Таким образом можно избежать сюрпризов в ходе измерительных полетов.

6.4 Измерительные полеты

Тип выполняемых измерительных полетов полностью зависит от местоположения антенны и используемого воздушного судна. Например, для измерения диаграммы направленности радиовещательной антенны в диапазоне ОВЧ при помощи вертолета необходимо использовать другие подходы, чем используются для измерения диаграммы направленности антенных решеток на средних волнах при помощи самолета. Различные типы измерительных полетов и их применение описываются в пп. 6 и 7. В процессе измерений сигнал, поступающий от испытуемой антенны, должен контролироваться на земле, чтобы обеспечить достаточную стабильность передаваемого сигнала.

6.5 Послеполетная оценка оборудования

Сразу по завершении измерительного полета необходимо повторить предполетную проверку, чтобы убедиться в сохранении работоспособности всего оборудования. Любые отклонения в работе должны быть зафиксированы, что поможет в последующей обработке результатов измерений.

6.6 Обработка и анализ данных

В процессе полета регистрируются все исходные измеренные данные. Комбинирование этих данных с известными значениями, такими как усиление измерительной антенны, местоположение передающей антенны и другие поправочные коэффициенты, позволяет построить желаемые диаграммы направленности антенны в реальном времени, при этом технический специалист получает хорошее представление о выполнении измерений в процессе полета. Более подробный анализ может быть осуществлен только на земле, когда имеется больше времени. Для оценки точности измерений используется статистическая информация, полученная на основании измеренных данных, и информация о калибровке оборудования. А дублирующие или пересекающиеся измерительные траектории могут использоваться для сопоставления измеренных данных. Это описывается в п. 7.

6.7 Отчетность

Унифицированный формат отчетности с использованием типовых элементов отчетности, нормализованных графиков и масштабирования графиков значительно упрощает быструю обработку и сравнение результатов различных измерений и поэтому рекомендуется. Это описывается в п. 9. Анализ погрешности измерений является важной частью данного отчета и без него отчет о результатах измерений будет малополезным. Пример такого расчета приводится в п. 8.

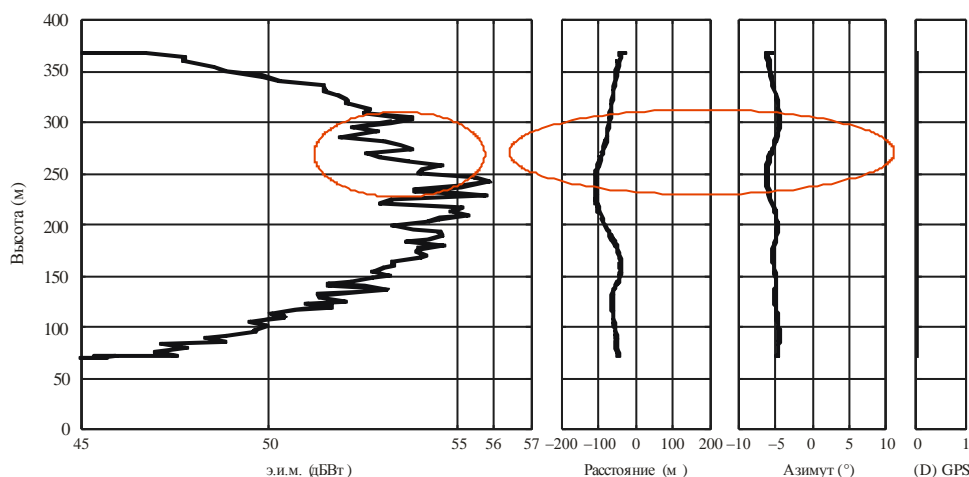
7 Обработка измеренных данных

7.1 Анализ данных

По завершении измерений данные должны быть проанализированы, чтобы определить, соблюдались ли критерии точности. Для этого строится несколько графиков, отображающих все собранные точки измерений. На том же графике, что и результаты измерений, должна отображаться дополнительная информация, такая как погрешности определения высоты и траекторий, чтобы обеспечить возможность корреляции, например, погрешностей полета с аномалиями в результатах измерений. Пример приведен на рисунке 14, отображающем вертикальную диаграмму направленности антенны в сочетании с тремя дополнительными диаграммами. Слева направо диаграммы означают Э.И.М., отклонение от целевого расстояния, отклонение от целевого азимута и погрешность устройства определения местоположения. Помеченные участки диаграммы, возможно, непригодны для использования из-за объединения погрешностей расстояния и азимута. Первый анализ может использоваться для исключения некоторых участков диаграмм или принятия решения о повторном измерении данных участков. Аналогичный процесс должен выполняться для круговых и горизонтальных полетов.

РИСУНОК 14

Вертикальная диаграмма с полетной информацией



Вертикальный полет			ЛОПІК 2004-05-11 LPs 94.3 MHz Radio 4				
Высота			Расстояние	Азимут	Дата	Время	Файл данных измерения
От	До						
70 м	367 м		950 м	314°	12 мая 2004 года	10:15	ЛОПІК 2004-05-11 LPs.M01

Report SM.2056-14

7.2 Сопоставление результатов различных полетов

При выполнении различных полетов для одного передатчика зачастую возможно произвести сопоставление результатов соответствующих измерений. Это может быть сделано не только при повторении одного и того же типа полета, но и тогда, когда траектории различных полетов пересекаются. Имея достаточное количество точек с результатами измерений по каждому полету вблизи места пересечения, можно рассчитать значения среднего и среднеквадратичного отклонения. Это может быть выполнено для определения степени корреляции и оценки достигнутой точности.

7.3 Обработка данных

Требования к точности измерений диктуют необходимость использования большего количества точек измерения, чем требуется для представления. Поэтому существует возможность сокращения объема данных. Это увеличивает конечную точность для представленной точки, а конечная диаграмма становится более сглаженной, что облегчает ее сравнение с другими диаграммами и эталонными кривыми.

Например, если для горизонтальной диаграммы направленности требуется одна измерительная точка на азимутальный градус, а выполнено 20 измерений на градус, усреднение значений для одного градуса приведет к получению значения, которое будет ближе к реальному.

Наиболее распространенным способом сделать это является использование окна усреднения на заданном интервале времени. Форма и длина такого окна должны быть согласованы с интервалом, в течение которого ожидаются значительные изменения значений. Предпочтительным методом является использование скользящего окна усреднения за интервал времени. Помимо среднего значения может также рассчитываться среднеквадратичное отклонение в данном окне. Форма и длина окна оказывают существенное влияние на конечные результаты и должны выбираться с осторожностью. По той же причине величина и тип сглаживания должны быть указаны в окончательном отчете по результатам измерений.

8 Расчеты погрешности измерений

Каждая измеренная диаграмма направленности антенны должна сопровождаться расчетом погрешности измерения. Без таких данных результаты измерения будут бесполезными для целей проверки диаграмм.

8.1 Типичная погрешность измерения

Для описания типичной погрешности измерения измерительной системы может использоваться обобщенный расчет погрешности измерений. Определяются и оцениваются все источники погрешности, которые обычно присутствуют в измерительной системе и в процессе выполнения измерений, после чего производится расчет общей погрешности измерений, которая называется *типичной погрешностью измерения системы*. Эта цифра дает общее представление о точности измерительной системы для усредненной ситуации измерений. Типичная погрешность измерения от 1,5 до 2,5 дБ для интервала 95% может считаться хорошим результатом. Этого можно достигнуть, только если все основные источники погрешности сводятся к минимуму, а измерение выполняется с высокой точностью.

8.2 Фактическая погрешность измерения

Однако для каждого отдельного измерения должен быть выполнен индивидуальный расчет погрешности измерения, учитывающий особые обстоятельства, которые имели место в процессе выполнения фактических измерений. Например, колебания, связанные с отражениями от земли и ошибками пилотирования, будут различаться для каждого измерения, каждой передающей станции и каждой конфигурации передающей антенны. Только учитывая такие различия можно получить правильные данные о точности измерения для каждого отдельного измерения.

Одним из подходящих способов это сделать является расчет обобщенной точности измерения, изучение всех результатов данного расчета и их корректировка в зависимости от конкретных обстоятельств, которые наблюдались в процессе измерения. Анализ данных по результатам измерений, как описывается в п. 7, будет важным вкладом в этот процесс. Значение, рассчитанное таким образом, называется *фактической погрешностью измерения* и является уникальным для каждого измерения. В отчете по результатам измерений должна быть указана данная величина, а не типичное значение.

8.3 Методология

Расчет погрешности измерений должен производиться и представляться в соответствии с действующими международными стандартами, например ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements".

При использовании данного метода каждое измерение сначала описывается, а затем приводится математическая формула, на основании которой вычисляется конечный результат с использованием индивидуальных переменных. Затем описываются все эти переменные со своими погрешностями и устанавливаются весовые коэффициенты их влияния на конечный результат. Если переменные, связанные с источником, выражены в логарифмическом виде, их сначала надо преобразовать в линейные значения. На основании этой информации рассчитывается погрешность конечного результата и представляется в нормализованной форме. Так же определяются основные составляющие, которые вносят вклад в общую погрешность.

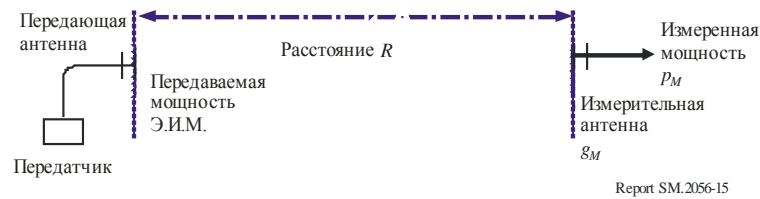
8.4 Пример расчета погрешности измерения

В данном разделе приводится практический пример расчета фактической погрешности для системы измерения диаграмм направленности антенны. Этот пример иллюстрирует влияние различных источников погрешности и предназначен для оказания помощи при проведении собственного анализа погрешности измерений. Значения, используемые в этом примере, являются произвольными, и на практике могут быть лучше или хуже в зависимости от усилий, затраченных на оптимизацию расчетного процесса.

Данный пример описывает вымышленную систему измерения на базе вертолета, измеряющую горизонтальную диаграмму направленности антенны передатчика ЧМ-радиовещания в диапазоне ОВЧ, выраженную в единицах ERP (Э.И.М.), начиная с измерения EIRP (Э.И.И.М.), если параметры указаны в децибелах, или с измерения e_{irp} (э.и.и.м.) – в противном случае. Мощность p_M измерялась на расстоянии R от передающей антенны. Это было сделано при помощи измерительной антенны с усилением g_M и измерительного приемника (см. рисунок 15).

РИСУНОК 15

Измерение EIRP (Э.И.И.М.)



В каждой измерительной точке был выполнен следующий расчет по формуле (1):

$$\text{Э.И.И.М.} = \frac{16\pi^2}{c^2} \cdot \frac{P_M \cdot R^2 \cdot f^2}{g_M},$$

где:

- $P_{\text{Э.И.И.М.}}$: мощность относительно изотропного излучателя (Вт);
- P_{RX} : мощность на входе приемника (Вт);
- R : расстояние между приемной и передающей антеннами (м);
- g_{RX} : усиление (линейное значение) приемной антенны относительно изотропного излучателя;
- f : частота (Гц);
- c : скорость света (м/с).

Указанная выше формула только рассчитывает измеряемое значение Э.И.И.М. в данной конкретной точке пространства. Существует ряд дополнительных факторов, которые могут привести к различиям измеренного значения Э.И.И.М. от фактического значения Э.И.И.М. передающей антенны. Если учитывать данные факторы в формуле, то она принимает следующий вид:

$$P_{\text{Э.И.И.М.}} = \frac{16\pi^2}{c^2} \cdot \frac{P_M \cdot R^2 \cdot f^2}{g_M} \cdot a_{REF} \cdot a_H,$$

где:

- a_{REF} : отражения: интерференция прямой и отраженной волн;
- a_H : влияние некорректной высоты полета.

Полученное значение Э.И.И.М. преобразуется в Э.И.М. при помощи формулы (3). Поскольку эта формула содержит только одну теоретическую постоянную, она не влияет на общую погрешность измерения. Погрешность измерения Э.И.М. зависит от погрешности измерения входных параметров. Некоторые из этих параметров в свою очередь имеют несколько источников погрешности, формирующих их совокупную погрешность. Источники погрешностей, относящиеся к данному примеру, рассматриваются ниже.

Постоянные величины

Эта формула содержит постоянные величины: 16, π и скорость света c . Поскольку они являются абсолютно неизменными и полностью известными, их вклад в общую погрешность системы отсутствует.

Частота

Частота f , используемая в данной формуле, представляет собой несущую частоту – в этом примере 100,1 МГц. В действительности не все измеренные компоненты мощности находятся на данной частоте из-за модуляции передатчика. Предположив, что большая часть мощности сосредоточена в пределах 100 кГц от несущей частоты, относительная погрешность Δf составляет около 0,1%. Распределение погрешностей предполагается равномерным.

Расстояние

Погрешность расстояния вызвана погрешностью измерения трехмерного положения передающей антенны и измерительной антенны на воздушном судне. В данном примере полет по кругу производится практически на одной высоте с передающей антенной с наклоном книзу в 5° . Поэтому горизонтальные погрешности оказывают гораздо большее влияние на результирующую точность, чем вертикальные составляющие, поэтому рассчитываются и используются коэффициенты чувствительности. Кроме этого, источниками погрешности являются положение электрического фазового центра передающей антенны, разница в горизонтальном и вертикальном положениях измерительной антенны и устройства определения местоположения на воздушном судне. Погрешность определения расстояния R рассчитывается отдельно и используется в качестве входного значения для последующих расчетов. (Расчет погрешности R , как правило, приводится в отчете, но опущен в данном примере.) Результирующая погрешность равна 6 м и имеет нормальное распределение с вероятностью 95%. В данном примере, когда полет по кругу совершался на расстоянии 1100 м, данная погрешность составляет 0,56%.

Усиление антенны

Погрешность усиления антенны вызвана погрешностью калибровки антенны, РЧ-кабелями, остаточным рассогласованием поляризации и горизонтальным и вертикальным отклонением положения антенны. В формуле (g_M указывается как линейное значение, G_M дБ):

$$g_M = g_{CAL} \cdot a_{CBL} \cdot a_{HOR} \cdot a_{VERT} \cdot a_{POL}$$

Мощность RX

Погрешность принимаемой мощности вызвана погрешностью калибровки приемника, рассогласованием между антенной и приемником, потерями в фильтре ПЧ, вызванными слишком широкой полосой пропускания передатчика, а также утечкой передатчиков соседних каналов. В формуле (p_M указывается как линейное значение, P_M дБ):

$$P_M = P_{M-CAL} \cdot a_{MIS} \cdot a_{FILT} \cdot a_{NABU}$$

Отражения

Одним из основных вкладов в общую погрешность измерений является отражение от земли. Относительная амплитуда отражений зависит от отражающей способности земной поверхности и расположенных на ней объектов. Уровень отраженных сигналов снижается благодаря относительной разности в длине пути прямой и отраженной волны, а также благодаря вертикальной диаграмме направленности передающей и приемной антенн. Уровень отражения от земли в данном примере был получен исходя из анализа фактических измерений и составляет в этом случае 1,7 дБ.

Погрешность определения высоты

При полете на высоте, отличной от высоты, на которой должно производиться измерение диаграммы направленности, полученное значение Э.И.М. будет отличаться от Э.И.М. передающей антенны. Погрешность определения высоты вызвана погрешностью измерения высоты антенны во время обследования станции, погрешностью измерения устройства определения местоположения воздушного судна и погрешностью пилотирования в процесс выполнения измерения. Результирующая погрешность Э.И.М. зависит от расстояния до передающей антенны и ее направленности в вертикальной плоскости.

В этом примере суммарная погрешность высоты составила 23 м с нормальным распределением и доверительным интервалом 95%. На расстоянии 1100 м это соответствует вертикальному углу $1,2^\circ$. Вертикальная диаграмма направленности 4-ярусной радиовещательной антенны такова, что результирующая погрешность Э.И.М. составляет около 0,1 дБ.

Расчет общей погрешности измерений для данного примера показан в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1
Расчет общей погрешности измерений

Символ	Источник	Погрешность		Распределение	Делитель	Коэффициент чувствительности, c_i	Средне-квадратическое отклонение источника, $u_i(a_x)$ (%)	Степени свободы, ν_i или ν_{eff}
		(± дБ)	(%)					
Скорость света								
c	Скорость света	Отсутствует						
Частота								
f	Радиочастота		0,1	Равномерное	1,7321	2	0,1	∞
Расстояние								
R	Расстояние между передающей и приемной антеннами		0,6	Нормальное	2	2	0,6	∞
Усиление антенны								
g_{M-CAL}	Калибровка усиления антенны	1,0	26	Нормальное	2	1	12,9	∞
a_{HOR}	Отклонение горизонтальной оси	0,2	4,7	Равномерное	1,7321	1	2,7	∞
a_{VERT}	Отклонение вертикальной оси	0,3	7,2	Равномерное	1,7321	1	4,1	∞
a_{POL}	Поляризационные потери	0,3	7,2	Равномерное	1,7321	1	4,1	∞
Измерение мощности								
p_{RX-CAL}	Калибровка приемника	1,5	41	Нормальное	2	1	20,6	∞
a_{MIS}	Рассогласование	0,09	2,1	U-образное	1,4142	1	1,5	∞
a_{FILT}	Снижение энергии за пределами полосы пропускания фильтра	0,15	3,5	Равномерное	1,7321	1	2,0	∞
a_{ADI}	Влияние соседнего канала	Пренебрежимо мало						
Отражение								
a_{REF}	Влияние отражений	1,7	47,9	Равномерное	1,7321	1	27,7	∞
Погрешность определения высоты								
a_H	Влияние погрешности определения высоты	0,1	2,3	Нормальное	2	1	1,2	∞
U_{ERP}	Суммарная стандартная погрешность			Нормальное			38	∞
U	Расширенная стандартная погрешность (95% доверит.)			Нормальное ($k = 2$)			75	∞

Фактическая погрешность измерения для данного примера составляет $10 \log_{10} (1 + U) = 2,4$ дБ.

9 Отчетность

Диаграмма направленности антенны должна приводиться в отчете, содержащем измеренную диаграмму совместно с резюме и выводами. Предпочтительно использование нормированного формата, это позволит производить сравнение различных измерений. Такой формат должен быть как можно более компактным, без пропуска основных параметров.

9.1 Унифицированный отчет

Унифицированный отчет наиболее легко описывается на следующем примере отчета. Удаленные главы отчета показаны *курсивом*, а информация, которая должна быть вписана, в зависимости от конкретной ситуации выделена подчеркиванием. В зависимости от результата или определенных событий во время измерений текст может быть изменен. Общая структура остается неизменной.

9.1.1 Резюме

12 и 14 сентября 2003 года агентство радиосвязи страны *A* произвело на борту воздушного судна измерения диаграммы направленности антенны вокруг передающей мачты в городе *B*. В процессе этой измерительной кампании измерения производились в отношении сигнала радиостанции *C* на частоте 102,2 МГц. Благодаря этим измерениям была определена диаграмма направленности используемой системы антенн.

9.1.2 Выводы

Эффективная излучаемая мощность радиостанции *C* в городе *B*, передаваемая на частоте 102,2 МГц, превышает ограничения лицензии на 15 дБ в азимутальном направлении 210°–270°. В азимутальном направлении 340°–0° эффективная излучаемая мощность на величину до 7 дБ ниже, чем планировалось.

9.1.3 Введение

Данное исследование было инициировано жалобами на прием сигналов радиостанции *C* в северном районе города *B*. Результаты мобильных измерений напряженности поля создали впечатление, что диаграмма направленности антенны радиостанции *C* не является оптимальной, поэтому на борту воздушного судна были проведены измерения диаграмм направленности антенны. 12 сентября 2003 года агентство радиосвязи страны *A* произвело на борту воздушного судна измерения диаграмм направленности антенны вокруг передающей мачты города *B*. В процессе этой измерительной кампании измерения производились в отношении сигнала радиостанции *C* на частоте 102,2 МГц. На основании этих измерений была определена диаграмма направленности используемой системы антенн. Измерения были повторены 14 сентября 2003 года, чтобы подтвердить воспроизводимость измерений. Настоящий отчет только представляет результаты измерений, но может быть использован в качестве входной информации для выполнения проверок или корректирующих мероприятий.

9.1.4 Результаты измерений

12 сентября 2003 года была дважды измерена горизонтальная диаграмма направленности антенны радиостанции *C* в городе *B*, передающей на частоте 102,2 МГц. Обе диаграммы были практически идентичны, подтверждая воспроизводимость измерений. 14 сентября 2003 года та же диаграмма была снова измерена дважды. Измерительные точки всех полетов совпали настолько хорошо, что невозможно найти различия между диаграммами. Таким образом, воспроизводимость достаточно высокая.

Диаграмма направленности антенны показана на рисунке 16. Эффективная излучаемая мощность в различных азимутальных направлениях показана на радиальной оси (дБВт). Красная линия показывает ограничения, оговоренные лицензией. Синяя линия представляет собой измеренную диаграмму направленности антенны.

9.1.5 Точность измерения

Точность измерения абсолютной эффективной излучаемой мощности составляет 1,5 дБ с доверительным интервалом 95% для данного конкретного измерения. Описание измерительной системы и расчет погрешности измерения приведены в виде отдельного отчета.

9.1.6 Нарушение условий лицензии

Результаты измерений сравниваются с ограничениями лицензии в таблице 2. В азимутальных направлениях между 210° и 270° горизонтальная диаграмма направленности превышает на величину до 15 дБ ограничения по эффективной излучаемой мощности, указанные в лицензии. В азимутальных направлениях между 340° и 360° эффективная излучаемая мощность на величину до 7 дБ ниже, чем указано в лицензии.

РИСУНОК 16

Диаграмма направленности антенны радиостанции С, город В, 102,2 МГц

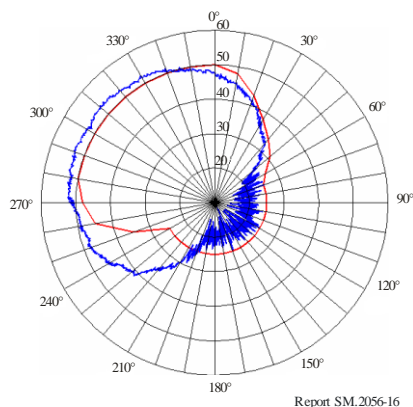


ТАБЛИЦА 2

Данные Э.И.М. и данные лицензии в табличной форме

Азимутальное направление	Лицензия	Измерено	Разница	Азимутальное направление	Лицензия	Измерено	Разница
	(дБВт)				(дБВт)		
0°	50	43	-7 дБ	180°	25	17	-6 дБ
10°	48	41	-7 дБ	190°	25	18	-7 дБ
20°	43	37	-6 дБ	200°	25	20	-5 дБ
30°	38	32	-6 дБ	210°	25	25	-0 дБ
40°	34	29	-6 дБ	220°	25	31	+5 дБ
50°	31	20	-11 дБ	230°	26	37	+10 дБ
60°	27	18	-9 дБ	240°	25	41	+15 дБ
70°	25	18	-7 дБ	250°	35	44	+8 дБ
80°	25	17	-8 дБ	260°	45	45	-1 дБ
90°	25	16	-9 дБ	270°	48	47	-1 дБ
100°	25	18	-7 дБ	280°	50	48	-2 дБ
110°	25	17	-8 дБ	290°	50	49	-1 дБ
120°	25	19	-7 дБ	300°	50	48	-2 дБ
130°	25	18	-7 дБ	310°	50	49	-1 дБ
140°	25	17	-9 дБ	320°	50	48	-2 дБ
150°	25	17	-8 дБ	330°	50	48	-3 дБ
160°	25	19	-6 дБ	340°	50	47	-4 дБ
170°	25	18	-8 дБ	350°	50	45	-6 дБ

9.2 Нормирование представляемых в отчете диаграмм направленности антенн

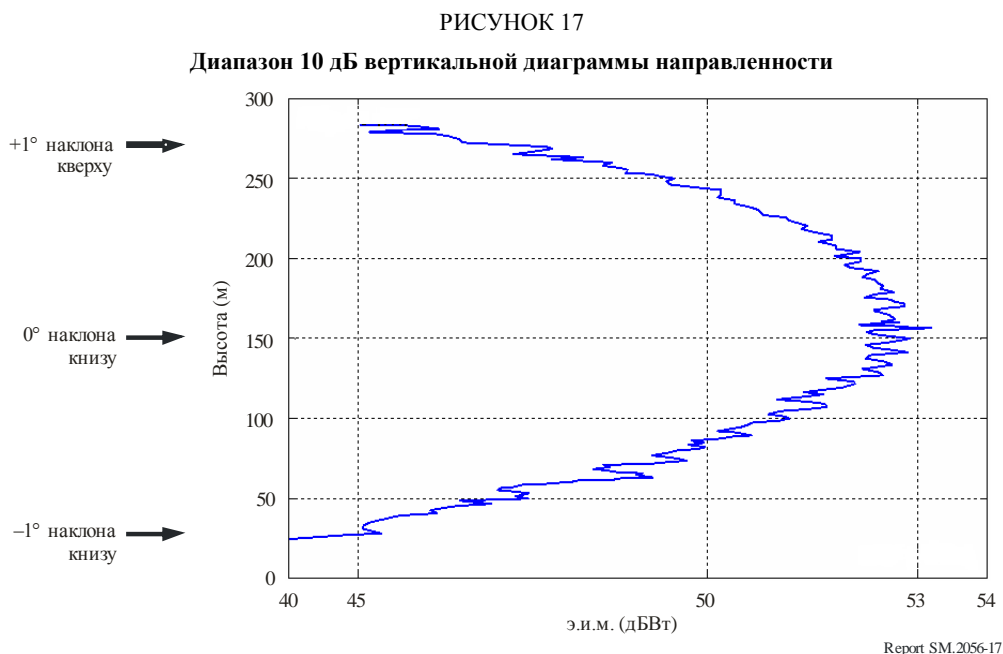
Изменение масштаба отображаемой диаграммы направленности антенны приведет к существенному изменению внешнего вида формы отчета. Поэтому желательно выработать некоторые предпочтительные форматы. Это облегчит сравнение результатов различных кампаний и даже различных администраций. Несколько предпочтительных форматов для большинства типов полетов приведено ниже.

9.2.1 Горизонтальная диаграмма направленности

Для горизонтальной диаграммы направленности, которая показана в примере, радиальная шкала должна быть линейно-логарифмической с диапазоном 50 дБ. Использование значений более 50 дБ нецелесообразно, поскольку даже большие антенные решетки не имеют коэффициента обратного излучения или направленности более 50 дБ. Поэтому нежелательно иметь на диаграмме отметки шкалы более 50 дБ.

9.2.2 Вертикальная диаграмма направленности

В примере отчета диаграмма вертикального полета не показана, хоть полет и осуществлялся фактически для определения правильной высоты измерения перед выполнением полета по кругу. В некоторых ситуациях вертикальная диаграмма направленности представляет особый интерес и поэтому должна быть приведена в отчете. В этом случае достаточно диапазона 10 дБ. При такой шкале наиболее просто выявить угол наклона главного лепестка и ширину вертикальной диаграммы направленности антенны. На рисунке 17 показана вертикальная диаграмма направленности с колебаниями около 3 дБ вследствие отражений от земли. Если исследуется подавление, например, излучений под большим углом, то шкала должна иметь диапазон 50 дБ, как и в случае с горизонтальной диаграммой направленности.



На приведенной для примера диаграмме вертикальная шкала указана в метрах относительно уровня земли.

Для фактической высоты механической антенны и расстояния полета возможно также выразить данную шкалу в градусах угла наклона.

9.2.3 Диаграмма распространения

Диаграммы горизонтальных полетов, которые совершаются для определения точки минимального отражения от земли, должны иметь вертикальную ось с диапазоном шкалы около 5 дБ. Этого достаточно для получения представления об отклонении мощности в точке минимального отражения, поскольку Э.И.М. должна быть неизменной на протяжении всей траектории полета.

РИСУНОК 18



9.2.4 Другие диаграммы

Другие диаграммы могут быть адаптированы по желанию для конкретных целей, но по мере возможности должны применяться выбранные диаграммы.

Приложение 2

Применения

1 Введение

В Приложении 1 приведено описание рекомендуемых процедур измерения, необходимого оборудования и процедур отчетности для измерений диаграмм направленности антенн с помощью воздушного судна. Данные рекомендации не зависят от выбранного типа воздушного судна и могут применяться независимо от используемой системы радиовещания.

Данное Приложение дает дополнительные рекомендации для некоторых конкретных радиовещательных систем, например, какие совершать измерительные полеты, какие использовать измерительные антенны и какие выбрать настройки приемника. Указанные радиовещательные системы служат в качестве примеров и не охватывают все возможные варианты. Типы полетов, указанные в данном Приложении, более подробно описываются в п. 4 Приложения 1. Фактически рекомендуемые типы измерительных полетов в значительной степени зависят также от используемого воздушного судна, но рекомендации по выбору конкретного воздушного судна здесь не приводятся, поскольку они рассматриваются в Приложении 3.

2 ЧМ-радиовещание в диапазоне ОВЧ

Следующие рекомендации пригодны для систем звукового радиовещания с частотной или фазовой модуляцией в диапазоне 87,5–108 МГц.

2.1 Диаграмма направленности

В системах ЧМ-радиовещания диапазона ОВЧ горизонтальная диаграмма направленности антенны измеряется в максимуме вертикальной диаграммы направленности. Измеряемая диаграмма направленности антенны выражается в значениях Э.И.М. с применением полуволнового диполя в качестве эталонной антенны.

2.2 Измерительные полеты

Максимум вертикальной диаграммы направленности антенны определяется при выполнении вертикального полета в одном или нескольких азимутальных направлениях. Данный максимум определяет высоту, на которой будет совершаться полет по кругу. Поскольку измерения диаграмм направленности антенн диапазона ОВЧ особенно чувствительны к отражениям от земли, выбирается такое расстояние выполнения измерений, на котором отражения приемлемы. Это расстояние можно определить, выполнив полет вдоль трассы распространения. Зная оптимальную высоту и оптимальное расстояние, можно выполнить полет по кругу, производя измерение желаемой диаграммы направленности антенны. Необходимо произвести как минимум два полета по кругу на заданной высоте и расстоянии, чтобы проверить воспроизводимость измерений. Последовательность измерений следующая: полет(ы) по трассе распространения, вертикальный(ые) полет(ы), полет(ы) по кругу.

2.3 Измерительная антенна

Измерения производятся с согласующейся поляризацией. Если поляризация передаваемого сигнала является эллиптической или изменяется в зависимости от азимутального угла, измерение необходимо выполнить для горизонтальной и вертикальной поляризаций одновременно или применить метод, не зависящий от поляризации, как описано в п. 5.2.5 Приложения 1.

Хорошая измерительная антенна для такого применения имеет достаточно малый вертикальный угол раскрытия, чтобы в достаточной мере подавлять отражения от земли, в сочетании с приемлемым постоянным усилением в вертикальной и горизонтальной плоскостях вокруг главного направления для облегчения юстировки. Для измерительной антенны нет необходимости иметь большое усиление, даже уровни усиления всего лишь -15 дБд все еще допускаются. Полноразмерные антенны не очень практичны в этом диапазоне частот, принимая во внимание ветровую нагрузку и прочие проблемы с механической частью.

2.4 Настройки приемника

Настройки фильтра приемника представляют собой компромисс между устранением влияния соседнего канала и мешающей амплитудной модуляции (АМ), генерируемой фильтром. Ширина полосы ЧМ-радиовещательных сигналов ограничена регламентарными положениями, но должна проверяться перед проведением измерения с помощью метода маскирования согласно Рекомендации МСЭ-R SM.1268. Если сигналы слишком широкополосные относительно применяемого фильтра, в измеренном сигнале генерируется нежелательная амплитудная модуляция. Это приводит к увеличению погрешности измерения. Если это позволяет загрузка соседнего канала, должен выбираться широкополосный фильтр с высоким коэффициентом формы (фильтр Гаусса).

Среднеквадратичный детектор является хорошим выбором для измерений, не зависящих от поляризации, но если этот метод не применяется, можно использовать детектор среднего значения. Пиковый детектор или детектор отсчетов может использоваться, когда имеется достаточное количество измерительных точек для последующего выполнения усреднения. Последнее может быть необходимо для ограничения влияния небольших погрешностей измерения, вызванных помехами от соседних каналов, или ограничения полосы пропускания фильтра приемников относительно измеряемого сигнала.

3 Радиовещание на средних волнах (СВ) с АМ

Антенные системы, применяемые в СВ-радиовещании, характеризуются большими размерами. С механической точки зрения в случае больших антенных решеток условие дальнего поля начинает работать с расстояния более чем 1λ от антенны. Как правило, излучается высокий уровень мощности, поэтому для измерения могут использоваться небольшие, менее эффективные антенны. В большинстве случаев поляризация является вертикальной. Станции СВ-радиовещания зачастую предназначены для обслуживания относительно больших региональных зон и не используют узкие или веерные диаграммы направленности. Полоса пропускания является более или менее постоянной, следовательно, может применяться канальный фильтр с низким коэффициентом формы (канальный

фильтр). Используется модуляция типа АЗЕ и поэтому предпочтительным детектором является детектор СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ. В процессе измерения схемы экономии энергии, такие как динамическая амплитудная модуляция (ДАМ), должны быть отключены. СВ-антенны, как правило, являются наземными. Они имеют весьма низкий вертикальный угол излучения. Обычно они являются ненаправленными или имеют незначительную направленность – направленность более 8 дБ является исключительным случаем. Для получения хорошего изображения трехмерной диаграммы направленности антенны может быть произведено несколько полетов вокруг антенны на разных высотах, дополненных несколькими пролетами вблизи антенны. На основании результатов, полученных в этих измерительных точках, может быть построена трехмерная диаграмма направленности антенны с учетом того факта, что фактическая направленность антенны не может слишком сильно меняться при небольших приращениях угла.

4 Радиовещание на высоких частотах (ВЧ) с АМ

Антенные системы, применяемые в ВЧ-радиовещании, характеризуются большими размерами. С механической точки зрения в случае больших антенных решеток условие дальнего поля начинает работать начиная с расстояния в несколько длин волн от антенны. Как правило, излучается высокий уровень мощности, поэтому для измерения могут использоваться небольшие, менее эффективные антенны. В большинстве случаев поляризация является горизонтальной. Полоса пропускания является более или менее постоянной, следовательно, может применяться канальный фильтр с низким коэффициентом формы (канальный фильтр). Используется модуляция типа АЗЕ, поэтому предпочтительным детектором является детектор СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ. В процессе измерения схемы экономии энергии, такие как динамическая амплитудная модуляция (ДАМ), должны быть отключены.

Радиовещательные антенны диапазона ВЧ существуют во всех возможных формах – от всенаправленных радиаторов, излучающих под большим углом, до остронаправленных лучевых антенн для обслуживания конкретных удаленных зон по всему миру. Стратегия проведения измерений должна определяться в зависимости от предполагаемой диаграммы направленности антенны. В случае многовибраторных ВЧ-антенных решеток с прижатой к земле диаграммой направленности может производиться серия вертикальных и горизонтальных полетов в зоне вокруг главного луча. Эти измерительные точки могут использоваться для построения диаграммы направленности в секторе вокруг главного лепестка и первых боковых лепестков. Несколько полетов по кругу на различных высотах могут дать более расширенное общее представление о диаграмме направленности за пределами главного луча.

5 Радиовещание T-DAB

В большинстве случаев T-DAB развертывается в одночастотных сетях. Для получения точных результатов и измерения параметров только полезного передатчика необходимо использовать направленные измерительные антенны с высоким коэффициентом направленности. Полоса пропускания составляет 1,5 МГц и является постоянной, поэтому можно применять канальный фильтр. Часто используются передающие антенны с малым вертикальным углом раскрытия и наклоном книзу, а горизонтальная диаграмма направленности, как правило, является всенаправленной. В данном случае могут применяться те же типы полетов, что были указаны в разделе для ЧМ-радиовещания. Требования к измерительной антенне для радиовещания T-DAB в диапазоне ОВЧ аналогичны требованиям для ЧМ-радиовещания. T-DAB является цифровой системой, использующей мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM), поэтому правильным выбором является применение среднеквадратичного детектора.

6 Радиовещание DVB-T

Цифровое телевидение может работать в синхронизированном одночастотном режиме, и в большинстве случаев это действительно так. Для получения точных результатов и измерения параметров только полезного передатчика необходимо использовать направленные измерительные антенны с высоким коэффициентом направленности. Полоса пропускания составляет 2 или 8 МГц и является постоянной, поэтому можно применять канальный фильтр. Часто используются передающие антенны с малым вертикальным углом раскрытия и наклоном книзу, а горизонтальная диаграмма направленности, как правило, является всенаправленной. В данном случае могут применяться те же типы полетов, что были указаны в разделе для ЧМ-радиовещания. Измерительные антенны для данного диапазона частот, как правило, имеют достаточную направленность в вертикальной плоскости для подавления отражений. Следует избегать слишком узконаправленных диаграмм, поскольку это может усложнить правильную юстировку антенны.

Приложение 3

Воздушные суда для измерений диаграмм направленности антенн

1 Введение

Рекомендации, приведенные в Приложении 1, не зависят от выбранного типа воздушного судна и могут применяться независимо от используемой системы радиовещания. Выбор конкретного воздушного судна зависит от многих факторов, а также предоставляет особые возможности и накладывает ограничения на измерительную систему и возможные измерительные полеты. Эти вопросы рассматриваются в настоящем Приложении.

Данное Приложение имеет следующую структуру. В разделе 2 рассматриваются общие вопросы, которые касаются всех типов воздушных судов. Разделы 3 и 4 посвящены двум наиболее распространенным типам воздушных судов, применяемых для измерений диаграмм направленности антенн, соответственно вертолету и самолету. В разделе 5 рассматриваются другие менее распространенные воздушные суда.

2 Проблемы, касающиеся всех типов воздушных судов

Здесь обобщается информация по некоторым проблемам, которые касаются всех типов воздушных судов применительно к измерительному оборудованию.

- Вибрация может повредить компоненты измерительной системы. В частности, наиболее чувствительными являются жесткие диски в компьютерах и современных приемниках, реле в приемниках и дисплей летчика. Измерительная система должна быть смонтирована на амортизационных платформах, а характеристическая частота механического резонанса всей системы должна находиться за пределами частот вибрации воздушного судна во время полета.
- Оборудование воздушного судна, например инверторы и гирокомпасы, генерируют радиочастоты. Учитывайте это при размещении антенн (включая те, которые используются для навигации) в положении, где они принимают минимум радиочастот. Устанавливайте дроссели и ферритовые подавители РЧ-помех вокруг кабелей, излучающих радиочастоты. Это может быть сложно, но каждое воздушное судно должно быть доступным для периодического технического обслуживания, используйте эту возможность.

- Система энергоснабжения воздушного судна, как правило, является нестабильной, всегда используйте отдельный инвертор/стабилизатор.
- Для фиксации оборудования на воздушном судне должна использоваться стойка, прикрепленная к борту судна. Самым простым способом сделать это, является использование существующих точек крепления на воздушном судне, поскольку они уже сертифицированы для определенной нагрузки.
- Максимально допустимое время полета, поскольку не всегда существует возможность приземлиться и дозаправиться возле объектов, подлежащих измерению.
- Полезная нагрузка – воздушное судно должно быть способно перевозить оборудование и инженеров.

3 Вертолет

Вертолет очень часто выбирают для данного типа измерений. Причиной этого является его маневренность и возможность осуществлять вертикальный полет или очень медленно перемещаться в заданное положение. Он имеет весьма специфические недостатки – вибрация представляет собой гораздо более острую проблему, чем у самолетов, а полетное время является относительно дорогостоящим. При выборе вертолета в качестве платформы для измерений на борту необходимо обратить особое внимание на следующие факторы.

3.1 Маневренность

Самым большим преимуществом вертолета является его маневренность. Вертолет может легко изменять свое положение вдоль трех осей, что делает его пригодным для полетов по трассе распространения, полетов по кругу и вертикальных полетов. Следует упомянуть, что способность к вертикальному полету является уникальной. Кроме этого, вертолет может летать на очень низких скоростях, позволяя осуществлять при необходимости очень точное позиционирование. При полете по заранее заданной траектории чем ниже скорость полета, тем большее количество точек измерения приходится на пройденное расстояние. Однако низкая скорость полета играет побочную негативную роль, когда учитывается чувствительность к ветру.

3.2 Чувствительность к ветру

Вертолет имеет относительно низкую скорость полета, что делает его чувствительным к ветру. Его ориентация относительно антенной мачты будет меняться с изменением направления и силы ветра, что делает более сложной юстировку измерительной антенны. Поэтому направление измерительной антенны должно регулироваться в реальном времени на протяжении всего полета.

При выполнении полета по кругу любое воздушное судно будет иметь путевую скорость, которая меняется в зависимости от азимутального угла. На противоположных участках окружности ветер будет дуть в попутном направлении, а не в лоб. Это приводит к варьированию количества измерительных точек на пройденный азимутальный угол вдоль всей окружности. При использовании вертолета данный эффект гораздо сильнее выражен из-за низкой скорости полета.

3.3 Расходы

Полеты на вертолете являются относительно дорогостоящими. Это можно считать основным недостатком при выборе вертолета. Однако некоторые расходы ниже, чем для самолета, – расходы на посадку могут быть снижены, поскольку не всегда будет необходимость в аэродромах с посадочными полосами.

3.4 Гибкость

Взлет с посадкой и даже дозаправка топливом могут быть осуществлены фактически в любом месте при условии наличия достаточного свободного пространства. Это весьма практично, если несколько станций должны быть измерены последовательно. Дальность полета ограничена, поэтому частая необходимость в посадках и дозаправках топливом является одним из недостатков вертолета.

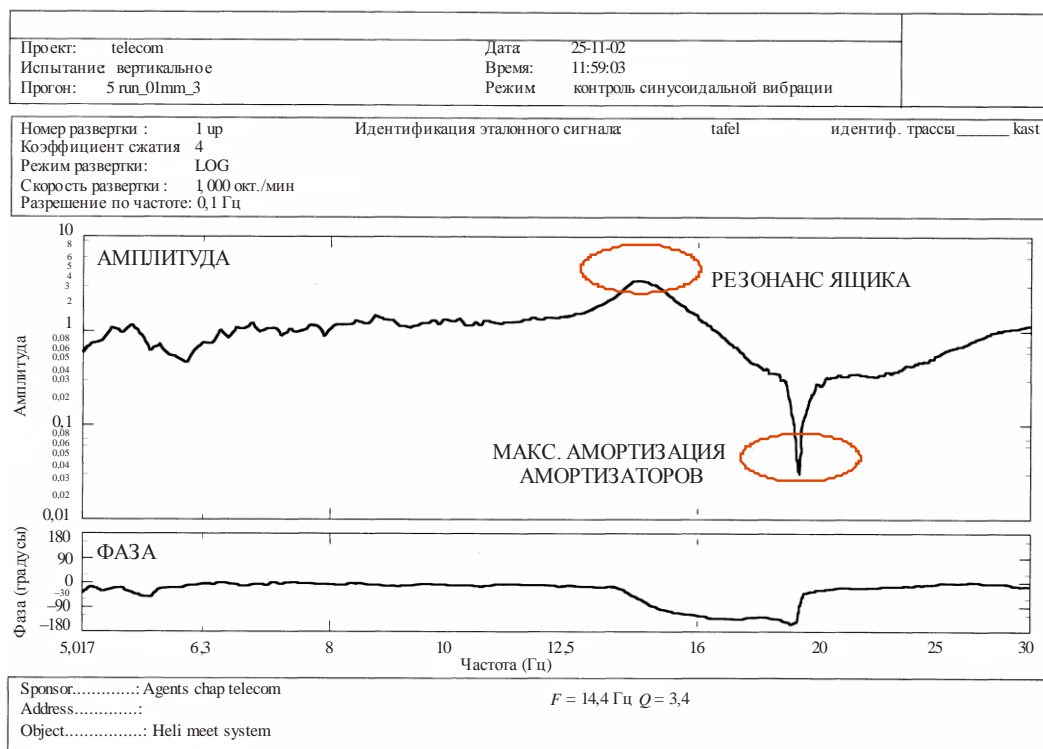
3.5 Вибрация

Вертолет создает сильную механическую вибрацию, которая разрушительно действует на измерительное оборудование. Эта вибрация образуется главным образом на частоте лопаток главного ротора. Эта частота примерно равна 10 Гц и зависит от типа вертолета и количества лопаток ротора. Компонентами, чувствительными к вибрации, являются реле, нефиксируемые разъемы, например печатные платы, установленные в слотах, и компьютерные жесткие диски. Если резонансная частота того или иного компонента измерительной системы совпадает с частотой вибрации вертолета, вибрация усиливается. Отдельные компоненты измерительной системы имеют относительно высокие резонансные частоты. Однако резонансная частота полностью собранной стойки может быть близка к частоте лопаток ротора.

Для решения этой проблемы стойка должна быть жесткой, чтобы увеличить ее резонансную частоту. Кроме того, стойка может быть установлена на амортизационную подвеску для дополнительного подавления вибрации, вызванной лопатками ротора. Поэтому амортизационная подвеска должна иметь максимальное демпфирование на частоте лопаток ротора. Несмотря на эти меры, отдельные компоненты измерительной системы все еще могут быть чувствительны к оставшейся вибрации. Должны быть рассмотрены индивидуальные решения для каждого компонента. После создания опытного образца рекомендуется провести испытания вашей системы на вибрационном стенде. На рисунке 19 показана развертка механических частот стойки с резонансной частотой около 13 Гц.

РИСУНОК 19

Результаты вибрационных испытаний



Это измерение помогает объяснить проблемы сильной вибрации, наблюдаемые во время первых испытательных полетов. Проблемы были устранены после доработки стойки в целях увеличения резонансной частоты и замены амортизационной подвески на другой тип устройства с более низкой частотой демпфирования.

3.6 Монтаж антенн

При монтаже антенны на вертолете необходимо учитывать несколько факторов. С точки зрения электрической схемы необходимо обеспечить работу антенны как в свободном пространстве, то есть должны быть предприняты меры, для того чтобы избежать отражений от корпуса вертолета или лопаток ротора. Дополнительное разграничение измерительной антенны и этих отражателей можно обеспечить путем установки выдвижной мачты под вертолетом и за счет проектирования диаграммы направленности антенны с малым по возможности вертикальным углом раскрытия. Низкая скорость полета и вертикальный взлет дают возможность выдвинуть антенну вниз вертолета. Поскольку антенна монтируется на конце мачты, ветровая нагрузка все еще представляет проблему, и поэтому мачта антенны должна быть спроектирована соответствующим образом. Антенна и ее мачта являются наружными элементами воздушного судна и должны удовлетворять всем нормам авиационной безопасности.

3.7 Регуляторные факторы

Для вертолетов действуют особые ограничения, зависящие от страны, в которой производятся измерения. Иногда дополнительные ограничения принимаются для иностранных вертолетных компаний, работающих за пределами своей страны происхождения. Ограничения могут касаться минимальной высоты полета, зон, запрещенных для полетов, или запрета полета над городами воздушных судов с одной двигательной установкой. Вертолетная компания должна быть способна предоставлять подробную информацию по этим вопросам и должна отвечать за соблюдение нормативных положений, связанных с измерениями диаграмм направленности антенн. Также существуют положения, которые благоприятствуют использованию вертолетов по сравнению с другими воздушными судами – низкий пролет на вертолете над городом зачастую более приемлем, чем на самолете, и к тому же зачастую допускается посадка в неподготовленном месте.

4 Самолет

При выборе самолета в качестве платформы для измерений на борту воздушного судна необходимо обратить особое внимание на следующие факторы.

4.1 Маневренность

При помощи самолета невозможно обеспечить стабильный измерительный полет по вертикали. Также невозможен полет по прямой линии в сторону антенной мачты с резкой остановкой вблизи антенны. Однако собственная устойчивость делает его наиболее подходящим для выполнения прямых полетов и полетов по кругу.

4.2 Чувствительность к ветру

Благодаря своей высокой скорости полета самолет менее чувствителен к ветру. Четкий пролет по кругу в условиях ветра не представляет проблемы. Конечно, летчик должен обладать достаточным опытом, а самолет должен быть оборудован надлежащим навигационным оборудованием. В связи с высокой скоростью полета количество измерительных точек на пройденном расстоянии сравнительно невелико, но они имеют более равномерное распределение даже при достаточно сильном ветре.

4.3 Расходы

Стоимость времени полета при использовании самолета является относительно недорогой. Это преимущество менее заметно в районах с дорогой платой за посадку.

4.4 Гибкость

Дальность полета на самолете сравнительно велика. Это может быть очень удобно при измерении нескольких станций или удаленных станций. Однако взлет и посадка требуют наличия официально оформленной взлетно-посадочной полосы, что ограничивает гибкость при использовании самолета.

4.5 Монтаж антенн

В связи с высокой скоростью полета измерительная антенна должна быть смонтирована вблизи фюзеляжа воздушного судна или должна применяться наружная антенна. Последняя представляет собой антенну, закрепленную на тросе за воздушным судном, что служит причиной дополнительной погрешности позиционирования, но в некоторых случаях этого не избежать.

4.6 Регуляторные факторы

В странах с большой плотностью населения зачастую запрещаются полеты на самолете на малых высотах над городами. В таких случаях диаграммы направленности антенн передатчиков, расположенных внутри городских районов, не могут быть измерены.

5 Другие воздушные суда

Также могут быть представлены другие решения. Другие воздушные суда, например дирижабли и беспилотные летательные аппараты, могут стать неплохим решением в конкретных ситуациях. Также могут рассматриваться обратные измерения, например облет вокруг антенной мачты с использованием модели самолета, оснащенной источником радиочастот, и измерение принимаемого сигнала на самой передающей антенне. Для каждого применения должны оцениваться конкретные требования и особые возможности воздушного судна, а измерительная система должна быть к нему адаптирована.
