

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R M.1314-1\*

**Уменьшение нежелательных излучений радиолокационных систем,  
работающих в диапазоне выше 400 МГц**

(Вопрос МСЭ-R 202/8)

(1997-2005)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации представлена информация, касающаяся конструктивных параметров, влияющих на характеристики нежелательных излучений радиолокационных передатчиков, которые следует принимать во внимание в процессе проектирования радиолокаторов. Она также содержит рекомендации по некоторым типам выходных устройств передатчика, которые могут реально способствовать минимизации нежелательных излучений.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что радиоспектр, имеющийся для использования службой радиоопределения, ограничен;
- b) что радионавигационная служба, согласно п. 4.10 Регламента радиосвязи (РР), является службой безопасности и помимо функций, характерных для радиолокационных систем некоторых других типов, таких как метеорологические радиолокаторы, может выполнять функции, связанные со спасением жизни;
- c) что сигналы радиолокационных станций службы радиоопределения занимают широкую полосу, что необходимо для эффективного выполнения функций этой службы;
- d) что новые системы, основанные на современных технологиях, могут использовать цифровые или другие методы и из-за высокого значения пиковой мощности огибающей могут оказаться более восприимчивыми к помехам, связанным с нежелательными излучениями радиолокаторов;
- e) что МСЭ-R занимается изучением вопроса эффективного использования радио спектра радиолокационными системами;
- f) что нежелательные излучения радиолокационных систем в некоторых случаях могут создавать помехи системам других радиослужб, работающих в смежных и гармонически связанных диапазонах;
- g) что в Приложении 3 к РР указываются максимально допустимые уровни мощности побочных излучений или совокупности побочных излучений и что в Рекомендации МСЭ-R SM.1541 указываются внеполосные пределы для радиолокаторов службы радиоопределения,

*рекомендует*

**1** для уменьшения нежелательных излучений, учитывать, приведенную в Приложении 1 информацию о конструктивных параметрах радиолокационных передатчиков, влияющих на характеристики нежелательных излучений радиолокаторов;

**2** там, где это практически осуществимо, для уменьшения интенсивности негармонических побочных излучений радиолокатора использовать самую передовую технологию изготовления выходных устройств радиолокатора;

---

\* Данную Рекомендацию необходимо довести до сведения Международной морской организации (ИМО), Международной организации гражданской авиации (ИКАО), Международного комитета по морской радиосвязи (СИРМ), Всемирной метеорологической организации (ВМО) и 1-й и 9-й Исследовательских комиссий по радиосвязи.

3 там, где это необходимо и практически осуществимо, для уменьшения нежелательных излучений радиолокатора использовать выходные фильтры.

## Приложение 1

### Уменьшение нежелательных излучений радиолокационных систем

#### 1 Введение

Для максимального повышения эффективности использования спектра радиолокационные передатчики следует выбирать, проектировать и конструировать так, чтобы спектр излучения снижался как можно быстрее, учитывая ограничения по таким показателям, как рабочие характеристики, размер, себестоимость, вес, безотказность, эксплуатационная надежность и т. д. Скорость спада спектра излучения (характеристик внеполосного излучения) и нижний уровень мощности излучения определяются аппаратным обеспечением и архитектурой передатчика, а также формой передаваемого сигнала. Эти факторы влияния рассматриваются ниже.

#### 2 Конструктивные параметры радиолокаторов

Конструкция радиолокатора во многом определяется его функцией или назначением. Функции радиолокаторов очень разнообразны (такие как: навигация, наблюдение за погодой, определение скорости ветра, разведка, отображение и картирование, слежение за местностью, измерение высоты и т. д.) и, как правило, требуют однозначной спецификации их характеристик. Эти функции радиолокаторов определяют некоторые их параметры, не зависящие от проектировщика, который оказывает непосредственное влияние на конструктивные параметры радиолокаторов, такие как: требуемая мощность передатчика, выбор формы сигнала передатчика, выбор выходного устройства передатчика, усиление антенны, чувствительность приемника, разрешающая способность по дальности и по азимуту и доплеровский охват. Продуманный выбор конструктивных параметров радиолокаторов, позволяющих улучшить управление спектром излучения, является ключевым фактором улучшения совместимости между радиолокационными системами и другими службами.

#### 3 Выбор и определение формы сигнала

Выбор типа формы импульсного сигнала и способа формирования сигнала тоже может оказать большое влияние на управление спектром и, таким образом, на совместимость. В большинстве радиолокаторов, в особенности в тех из них, в которых используется один генератор мощности или усилитель мощности, приходится учитывать факторы эффективности преобразования энергии и теплоотдачи для использования импульсов, имеющих, в основном, постоянную амплитуду, за исключением коротких переходов между импульсами субструктуры. Это ограничивает выбор типов форм сигнала. Тем не менее, даже при наличии такого ограничения сохраняется возможность сделать выбор, который может существенно повлиять на спектр излучения.

Сигналы радиолокатора можно первоначально подразделить на обычный или немодулированный импульс, сигналы (имеющие указатель излучения "PO") и сигналы с внутриимпульсной модуляцией. Внутриимпульсная модуляция обычно служит для компрессии импульсов, хотя бывают и исключения в случае сигналов, используемых для управления антенными решетками с частотной настройкой. Таким образом, внутриимпульсные модуляции можно дальше разделить на следующие подкатегории:

- непрерывная ЧМ или импульсы с линейной частотной модуляцией;
- ступенчатые ЛЧМ-импульсы;

- ступенчатые частотные импульсы, используемые в радиолокаторах с частотной настройкой;
- импульсы с дискретной кодировкой.

В плане управления спектром излучения основным принципом при выборе и определении формы сигнала является устранение неоднородности в как можно большем числе производных сигнала, поскольку это определяет достигаемую конечную крутизну спада спектра, выраженную в дБ/декадном сдвиге частоты. Таким образом, импульсные сигналы отличаются друг от друга разными амплитудными, фазовыми и частотными переходами в пределах импульса.

Конечно, все импульсные сигналы, конечно, содержат фронты подъема и падения по всей огибающей. При прочих равных условиях желательно, чтобы фронты подъема и падения были постепенными и плавными. Тем не менее, прочие условия не всегда равны. В частности, импульсы, генерируемые в устройствах с пересекающимися полями, требуют быстрых линейных изменений для восстановления сигнала, чтобы избежать возбуждения случайных колебаний, которые могли бы ухудшить спектр. При использовании усилителей, не относящихся к устройствам с пересекающимися полями, для управления спектром целесообразно использовать постепенные линейные изменения, если их реализация возможна. И все же такая реализация может быть затруднена, поскольку мощность рассеяния усилителей выше, когда они не выводятся в режим, близкий к насыщению; этим можно мотивировать использование быстрых изменений фронтов подъема и падения сигнала, даже когда это не касается побочных колебаний.

Непрерывная частотная модуляция или ЛЧМ-импульс, сигналы с высоким коэффициентом сжатия импульса или произведение от умножения ширины полосы на ширину импульса имеют очень высокие скорости падения спектра спектра. Это касается сигналов как с линейной, так и с нелинейной ЧМ. Основной причиной нежелательных спектральных составляющих этих форм сигналов является использование коротких фронтов подъема сигнала.

Ступенчатые ЛЧМ-сигналы имеют кусочно-постоянные частоты, которые однообразно возрастают или убывают на всей протяженности импульса. Их можно назвать подвидом ЛЧМ-сигналов с незатухающей линейной частотной модуляцией. Однако у ступенчатых ЛЧМ-сигналов, равно как и у форм сигналов с немонотонной ступенчатой частотой, которые используются в антенных решетках с частотной настройкой, спектры излучения хуже, чем у ЛЧМ-сигналов с непрерывной ЧМ. Это является следствием неоднородности формы сигнала. Вероятно, ее можно устранить путем использования ступенчатого ЛЧМ-сигнала, так чтобы поддерживать непрерывность фазы в местах соединения шагов частоты. Но даже и в этом случае неоднородность в первой производной, которая не проявляется в подлинных непрерывных сигналах с ЧМ, сохранится, поэтому и спектр будет хуже спектра импульса с непрерывной ЧМ с сопоставимым коэффициентом компрессии импульса.

Существуют также некоторые многофазно кодируемые сигналы, прототипом которых является сигнал с многофазным кодированием Франка; они эффективно аппроксимируют сигналы с внутриимпульсной частотной модуляцией, т. е. "постоянно закодированные" сигналы<sup>1</sup>. Тем не менее, эти сигналы содержат резкие перепады по фазе, поэтому их спектры не имеют столь крутого падения по сравнению со спектрами ЛЧМ-сигналов с непрерывной ЧМ.

В настоящей Рекомендации под сигналами радиолокатора с дискретным кодированием понимаются сигналы, не имеющие никакого сходства с сигналами с непрерывной ЧМ. Поскольку это исключает многофазные коды, большинство сигналов радиолокатора с дискретным кодированием можно разделить на сигналы с двухфазным кодированием и частотным кодированием. Сигналы, относящиеся к любой из этих категорий, могут использовать коды Баркера и коды на основе псевдослучайных двоичных последовательностей.

При отсутствии усовершенствований сигналы с дискретным фазовым кодированием имеют резкие переходы между "участками" с постоянной фазой. (То же самое можно сказать и в отношении кодов Франка и других многофазных кодов.) В результате их спектры сужаются только на 20 дБ/декада. Тем не менее, имеются некоторые варианты, которые могут улучшить спектры сигналов с фазовым кодированием.

В принципе, можно обеспечить произвольное быстрое сужение спектра сигнала РЧ возбуждения путем фильтрации модулирующих сигналов или самих модулируемых низкоуровневых сигналов (ПЧ или РЧ) возбуждения. Тем не менее, на практике эти коэффициенты усиления могут искажаться под воздействием вторичного увеличения

---

<sup>1</sup> Сигналы с внутриимпульсной частотной модуляцией иногда называют закодированными сигналами, даже если их "кодировка" не является дискретной.

спектра, которое происходит как в усилителе мощности передатчика, так и в приемниках в среде. В случае использования предмодуляционной фильтрации переходы между участками являются плавными, а не резкими, однако при двухфазных сигналах и тех многофазных сигналах, которые содержат фазовые переходы в  $180^\circ$ , внутри огибающей сигнала остаются нули и впадины, поскольку при переходе из одной фазы в другую, огибающая проходит через ноль. Этот факт сам по себе проблемы не представляет, однако полученные преимущества уменьшаются под воздействием двух факторов. Одним из них является преобразование АМ-ФМ, которое происходит в устройствах усилителя мощности. Образующаяся в результате внешняя фазовая модуляция расширяет спектр. Еще один недостаток заключается в том, что любое ограничение, происходящее либо в усилителе передатчика, либо в приемнике, подвергнутом воздействию помех, как правило, ведет к вторичному возникновению резких переходов к волновым колебаниям. Эти резкие скачки превращаются в нежелательные спектральные боковые полосы частот с краями спектра, которые вновь снижаются лишь на уровень 20 дБ/декада.

Такое вторичное увеличение спектра можно в определенной степени ослабить. Это можно сделать путем создания форм сигнала возбудителя колебаний, которые поддерживают почти постоянную огибающую не только в интервалах субимпульсов облучения, но и во время фазовых переходов. В таких формах сигнала фазовые переходы на  $180^\circ$  состоят из вращений фазы несущей в полукруге I-Q или в действительно-мнимой плоскости, а не в движениях вдоль осей I или Q, которые проходят через исходную точку. Это может быть осуществлено с помощью квадратурных модуляторов и подходящей схемы формирования сигнала.

Альтернативной категорией дискретно кодированного сигнала является частотная манипуляция с непрерывной фазой. По существу, эти формы сигнала являются такими же, как и так называемые сигналы с минимальной манипуляцией (ММН), используемые в некоторых системах связи. Хотя иногда их называют как фазоманипулированные сигналы, они фактически являются частотно-кодированными, поскольку фаза меняется непрерывно, в то время как в своей базовой нефильтрованной форме мгновенная частота меняется скачкообразно и остается постоянной на протяжении каждого импульса субструктуры. В форме сигнала нет каких-либо прерываний, но они имеются в первой производной. Следовательно, спектр достигает асимптот, которые уменьшаются со скоростью 40 дБ/декада. Более того, эти сигналы имеют постоянную огибающую даже во время переходов их импульсов субструктуры, поэтому они по своей природе устойчивы к проблемам перераспределения спектра, которые возникают у фазо-кодированных сигналов (поскольку сигналы с качающейся частотой не имеют импульсов субструктуры, они также устойчивы к перераспределению спектра вследствие ограничения и преобразования АМ-ФМ). В системах связи широко используется предмодуляционная фильтрация ММН сигналов. Ожидается, что такую фильтрацию можно было бы также использовать в радиолокаторах, в которых явление уменьшения спектра излучения теоретически становится круче, чем 40 дБ/декада.

Хотя крутизна в ослаблении спектра излучения желательна, ее нельзя добиваться без учета последствий в разрешении по дальности и в доплеровском охвате, обычно выражаемых в виде "функции неопределенности". Эта функция представляет собой величину выходного сигнала, индуцированного возвращенным от точечной цели отраженным сигналом и созданного фильтром, согласованным с переданным сигналом. Функция неопределенности является функцией дальности (задержка во времени) и доплеровского сдвига возвращенного от цели сигнала. Как один экстремальный пример, прямоугольный импульсный сигнал с линейной ЧМ с бесконечным произведением время-ширина полосы (т. е. бесконечный коэффициент сжатия) имел бы совершенно прямоугольный спектр, за исключением вклада фронтов подъема и спуска. Но отклик согласованного фильтра на такой сигнал представлял бы собой  $\sin(t)/t$  для отраженного от цели сигнала с постоянной Допплера. Такой отклик имеет временные (т. е. дальность) боковые лепестки только на 13 дБ ниже основного отклика, что недостаточно в некоторых применениях, требующих высокую степень разрешения многих целей. Отклик согласованного фильтра это не просто преобразование Фурье спектра излучения. Тем не менее существует тенденция, когда скачкообразное уменьшение спектра излучения сопровождается в отклике боковыми лепестками высокого уровня, во многом так же, как скачкообразные перепады во временном сигнале сопровождаются высокими боковыми лепестками в спектре излучения. В некоторой степени подавление боковых лепестков дальности может быть улучшено путем рассогласования процессора сигнала приемника с передаваемым импульсом, но это приводит к потере чувствительности согласованного фильтра в этом плане. Поэтому необходимо выбирать такой сигнал, который приводит к оптимальному соотношению между показателями управления спектром, подавления боковых лепестков дальности и чувствительности (в некоторых применениях хорошим компромиссом являются сигналы с качанием частоты, использующие слегка нелинейный ЧМ профиль). Тем не менее, в общем плане, требования к высоким разрешению и чувствительности сужают возможности разработчика. Кроме того, во многих радиолокационных применениях требуются практически равномерные характеристики в значительном разном доплеровских частот; т. е. требуется, чтобы они имели низкую "доплеровскую чувствительность". Это вводит еще одно ограничение на выбор разработчиком формы сигнала.

В системах связи улучшение характеристики ослабления уменьшения спектра, которое достигается за счет предмодуляционной фильтрации, происходит за счет ухудшения характеристики межсимвольной интерференции. Тем не менее, значительное улучшение управления использованием спектра может часто быть достигнуто еще до того, как межсимвольная интерференция становится неприемлемой. В радиолокаторе улучшение формы спектра, которое может быть достигнуто за счет использования предмодуляционной фильтрации, происходит за счет ухудшения характеристики разрешения радиолокатора. Следует также ожидать, что вследствие трудностей в разработке идеально согласованного фильтра (или процесса корреляции) для форм сигналов, содержащих скругленные углы (возникающие вследствие предмодуляционной фильтрации) вместо жестких границ, произойдут некоторые потери в чувствительности обнаружения. Тем не менее, как и в случае аналоговой системы связи, разумно ожидать, что значительное улучшение в управлении спектром может часто быть получено до того, как значительно ухудшится функция неопределенности или чувствительность. Как указано выше, исключение прерывистости как можно в большем числе производных формы сигнала – это то, что определяет конечную крутизну ослабления уменьшения спектра, которая достигается при больших сдвигах частоты. При этом не обязательно требуется, чтобы фильтр имел узкую ширину полосы частот, хотя ширина полосы частот определяет сдвиг частоты, при котором достигается последний лепесток спектра.

Предыдущее обсуждение относится к случаю, когда сигнал имеет постоянную амплитуду в течение срабатывания импульса субструктуры. Использование модулей разных усилителей мощности (обычно твердотельные усилители) в архитектуре волноводной или обычной комбинации открывает возможности для использования выровненных амплитудно-модулированных сигналов. Неизвестно их использование в современных радиолокаторах, но такие формы сигнала можно было бы использовать в будущем. Это создало бы новую степень свободы в разработке и могло бы быть частично использовано для управления спектром, излучаемым радиолокатором.

#### **4 Выбор выходных устройств радиолокатора**

Выбор выходного устройства передатчика радиолокатора влияет на конструкцию не только передатчика, но и приемника и антенных систем радиолокатора. Конструкция многофункциональных радиолокационных систем может также еще больше усложнить выбор выходного устройства радиолокатора. Другие важные факторы проекта при выборе выходного устройства включают: энергетическую эффективность (преобразование энергии ПТ в РЧ), мгновенную ширину полосы частот (имеющаяся в наличии настраиваемая ширина полосы частот без регулировки), когерентность импульс-импульс (относительная фаза каждого импульса, что важно для доплеровской обработки), вес, размер, механическая прочность, срок службы устройства и стоимость.

В таблице 1 приведены характеристики выходных устройств для основных конструктивных параметров, учитываемых при разработке радиолокационных систем. Как видно из таблицы 1, имеется широкий разброс характеристик выходных устройств для основных конструктивных параметров пиковой мощности, мгновенной ширины полосы и энергетической эффективности. Следует отметить, что для достижения цели(ей), стоящей(их) перед радиолокационной техникой, при выборе выходных устройств радиолокаторов должны быть прежде всего рассмотрены вышеуказанные конструктивные параметры. Характеристики побочных излучений выходных устройств радиолокаторов рассматриваются только после того, как достигнуты все поставленные цели.

ТАБЛИЦА 1

## Характеристики выходных устройств радиолокаторов, рассматриваемые при разработке радиолокационных систем

| Выходное устройство                                       | Диапазон изменения максимальной выходной мощности (кВт) | Эффективность преобразования энергии | Мгновенная ширина полосы на уровне 1 дБ (% от частоты несущей) | Импульсная когерентность | Вес (кг)          | Размеры   | Механическая прочность | Ожидаемый срок службы <sup>(1)</sup> | Относительная стоимость <sup>(2)</sup> |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|-----------|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| <i>С пересекающимися полями:</i> <sup>(3)</sup>           |                                                         |                                      |                                                                |                          |                   |           |                        |                                      |                                        |
| Усилители с пересекающимися полями                        | 60–5–000                                                | 40–65                                | 5–12                                                           | Да                       | 25–65             | Небольшие | Высокая                | 1,0                                  | Низкая                                 |
| Магнетроны (без блокировки)                               | 20–1–000                                                | 35–75                                | <sup>(4)</sup>                                                 | Нет                      | 1–25              |           |                        | 1,0                                  |                                        |
| Магнетроны (с блокировкой)                                | 20–1–000                                                | 35–75                                | <sup>(4)</sup>                                                 | Да                       | 1–25              |           |                        | 1,0                                  |                                        |
| Коаксиальные магнетроны                                   | 10–3–000                                                | 35–50                                | <sup>(4)</sup>                                                 | Нет                      | 2–55              |           |                        | 5,4                                  |                                        |
| <i>Приборы с прямолинейным электронным потоком:</i>       |                                                         |                                      |                                                                |                          |                   |           |                        |                                      |                                        |
| Лампа-резонатор бегущей волны                             | 25–200                                                  | 20–40                                | 10–15                                                          | Да                       | 10–135            | Большие   | Высокая                | 7,4                                  | Высокая                                |
| Клистрон                                                  | 20–10 000                                               | 30–50                                | 1–12                                                           | Да                       | 25–270            |           |                        | 13,5                                 | Средняя                                |
| Твистрон                                                  | 2 000–5 000                                             | 30–40                                | 1–12                                                           | Да                       | 55–65             |           |                        | 10,4                                 | Высокая                                |
| <i>Твердотельные транзисторы (Параллельные С-модули):</i> |                                                         | <sup>(6)</sup>                       |                                                                |                          |                   |           |                        |                                      |                                        |
| Биполярные кремниевые                                     | 10–90                                                   | 20–30                                | 10–30                                                          | Да                       | 0,5–2,5 на модуль | Небольшие | Очень высокая          | 15                                   | Высокая                                |
| Галлиево-мышьяковый полевой транзистор <sup>(5)</sup>     | 0,5–5,0                                                 | 10–25                                | 10–30                                                          |                          |                   |           |                        |                                      |                                        |

<sup>(1)</sup> Ожидаемый срок службы приведен к сроку службы обычного магнетрона 1970-х годов и не отражает более долгий ожидаемый срок службы обычных магнетронов на основе более новой технологии.

<sup>(2)</sup> Зависит от масштабов производства.

<sup>(3)</sup> Наиболее вероятно, что выходные устройства с пересекающимися полями будут сняты с эксплуатации в будущих радиолокационных разработках; тем не менее, ожидается, что их продолжают использовать в морских радионавигационных системах.

<sup>(4)</sup> Хотя магнетроны не имеют мгновенной ширины полосы частот, для них все равно можно добиться, чтобы частота настройки менялась в диапазоне до 10% от рабочей частоты.

<sup>(5)</sup> Кремниевые (Si) биполярные модули обычно используются на частотах ниже 3,5 ГГц, а галлиево-мышьяковые (GaAs) модули в диапазоне 5 ГГц.

<sup>(6)</sup> Зависит от числа модулей на выходе.

Уровни побочных излучений от радиолокационных передатчиков зависят от типа выходного устройства, используемого в радиолокационном передатчике. Знание характеристик собственных побочных излучений различных выходных устройств, используемых в радиолокационных передатчиках, весьма важно для обеспечения эффективного использования спектра и минимизации помех службам, работающим в смежных полосах.

В таблице 2 перечислены характеристики паразитных излучений (негармонических и гармонических) для выходных устройств, используемых в радиолокационных системах. Уровни собственных негармонических излучений радиолокационных систем, использующих выходные устройства с перекрещивающимися полями, таковы, что требуют фильтрации, если ограничения на побочные излучения превышают  $-60$  дБс. Как приборы с прямолинейным электронным потоком, так и твердотельные выходные устройства имеют уровень собственных негармонических побочных излучений ниже  $-100$  дБс. Уровень гармонических побочных излучений для всех выходных устройств меняется в диапазоне от  $-15$  до  $-55$  дБс, так что для подавления гармонических побочных излучений необходима фильтрация. Для радиолокаторов, использующих распределенные выходные устройства (фазированные антенные решетки), фильтрация может оказаться практически неосуществимой.

ТАБЛИЦА 2

**Характеристики импульсных побочных излучений выходных устройств систем радиоопределения, работающих в диапазонах 3 и 5 ГГц**

| Выходное устройство <sup>(1)</sup>                        | Уровень побочных излучений       |                                            |       |       |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|-------|-------|
|                                                           | Негармонические<br>(дБс) в 1 МГц | Гармонические <sup>(2), (3)</sup><br>(дБс) |       |       |
|                                                           |                                  | 2-й                                        | 3-й   | 4-й   |
| <i>С пересекающимися полями:</i>                          |                                  |                                            |       |       |
| Усилители с пересекающимися полями                        | $-35$ до $-50$ <sup>(5)</sup>    | $-25$                                      | $-30$ | $-45$ |
| Магнетроны (без блокировки) <sup>(4)</sup>                | $-65$ до $-80$ <sup>(5)</sup>    | $-40$                                      | $-20$ | $-45$ |
| Магнетроны (с блокировкой) <sup>(4)</sup>                 | $-75$ до $-90$ <sup>(5)</sup>    | $-40$                                      | $-20$ | $-45$ |
| Коаксиальные магнетроны <sup>(4)</sup>                    | $-60$ до $-75$ <sup>(5)</sup>    | $-40$                                      | $-20$ | $-45$ |
| <i>Приборы с прямолинейным электронным потоком:</i>       | <sup>(6)</sup>                   |                                            |       |       |
| Связанные резонаторы ЛБВ                                  | $-105$ до $-115$                 | $-20$                                      | $-25$ | $-35$ |
| Клистрон                                                  | $-110$ до $-120$                 | $-20$                                      | $-25$ | $-35$ |
| Твистрон                                                  | $-105$ до $-115$                 | $-20$                                      | $-25$ | $-35$ |
| <i>Твердотельные транзисторы (Параллельные С-модули):</i> |                                  |                                            |       |       |
| Биполярный кремниевый                                     | $-100$ до $-110$                 | $-45$                                      | $-55$ | $-65$ |
| GaAs полевой транзистор                                   | $-100$ до $-110$                 | $-35$                                      | $-45$ | $-55$ |

(1) Для систем, работающих в диапазоне выше 5 МГц, могут быть более приемлемы альтернативные выходные устройства. Эти варианты включают, но не ограничиваются ими, лампы бегущей волны со спиральной/кольцевой шиной и магнетроны по новой технологии.

(2) Перечислены номинальные значения гармонических побочных излучений. Диапазон гармонических побочных излучений обычно составляет от  $+5$  до  $-10$  дБ от номинального значения.

(3) Уровни гармонических излучений можно понизить до более чем  $-100$  дБс с помощью фильтра гармоник (фильтра низких частот).

(4) Для выходных устройств на основе магнетрона более старого образца характерны колебания вида  $\pi - 1$ , которые могут быть всего на 40 дБ ниже несущей. Эти колебания прерывистые, их длительность невелика и они возникают в начале вибраций. У магнетронов, спроектированных по новой технологии, такие излучения подавлены.

(5) Уровни негармонических излучений выходных устройств с перекрещивающимися полями можно понизить более чем до  $-100$  дБс с помощью волноводного полосового фильтра. Вносимые потери этих фильтров обычно составляют несколько десятков дБ.

(6) Выходные устройства с прямолинейным электронным потоком могут давать близкие к несущей негармонические побочные излучения порядка от  $-80$  до  $-90$  дБс, в зависимости от общей избирательности резонатора.

## 5 Выходные фильтры радиолокатора

РЧ фильтры на выходе передатчика могут быть очень полезны для подавления гармонических излучений. РЧ фильтры могут также быть использованы для подавления внеполосных и негармонических побочных излучений, которые расположены ближе к основному излучению, чем гармоники. Тем не менее, их полезность для управления относительно близкими частями спектра излучения ограничена. Это частично связано с их дополнительной стоимостью, весом и размером, а также с тем обстоятельством, что многие радиолокаторы являются настраиваемыми и/или используют различные формы сигналов, некоторые из которых имеют значительно более широкие полосы частот, по сравнению с другими. Вряд ли возможно разработать РЧ фильтры высокой мощности, которые можно перестраивать для учета изменений несущей частоты или формы импульсов, особенно когда считается, что такие изменения происходят, по всей вероятности, в течение миллисекунд.

Архитектура передатчиков является также важным фактором достигаемой степени управления спектром. Когда используются различные усилители мощности, на скорость и уровень ослабления спектра излучения влияет то, объединяются ли выходные сигналы от этих усилителей мощности в волноводе передатчика или только в пространстве после излучения. Объединение в волноводе фактически создает значительное рассогласование сопротивлений для взаимно несвязанных составляющих сигналов на выходе усилителей мощности, что может значительно уменьшить излучаемую мощность шума относительно суммы имеющихся мощностей шума усилителей. С другой стороны, в случае радиолокаторов с антенной решеткой, питаемой различными усилителями, пространственное объединение мощности является привлекательной архитектурой, но она позволяет излучать всю мощность шума. Возможности для РЧ фильтрации в таких антенных решетках также ограничены. Это частично связано с тем, что для каждого усилителя потребовался бы отдельный фильтр, в то время как число усилителей может составлять сотни или тысячи. Это также частично вследствие того, что расстояние между фильтрами должно составлять порядка половины длины волны, поскольку излучающие элементы обычно находятся на таком расстоянии друг от друга, чтобы избежать появления неприемлемых лепестков в диаграмме усиления антенны. Для очень эффективной фильтрации такое расстояние является недостаточным.

Как видно из таблицы 2, выбор выходного устройства радиолокатора оказывает решающее влияние на требования к фильтрации негармонических побочных излучений. Однако, как упоминалось выше, выбор выходного устройства радиолокатора нельзя сделать, целиком полагаясь на характеристики побочных излучений. Поскольку всем выходным устройствам свойственны гармонические побочные излучения высокой интенсивности, для подавления этих излучений, если это практически возможно, обычно используются фильтры гармоник (фильтры низких частот). Для уменьшения диапазонов негармонических побочных излучений некоторых радиолокаторов средней и высокой мощности в полосах частот, смежных со службой радиоопределения, для некоторых выходных устройств радиолокаторов после передатчика радиолокатора также могут потребоваться полосовые фильтры. Эти фильтры обычно должны быть изолированы от фильтров для подавления гармоник, поскольку обычно нельзя одновременно обеспечить необходимую ширину полосы непрозрачности фильтров подавителей гармонических колебаний и достаточно резкую границу среза режекторных фильтров в смежной полосе. Тем не менее, необходимое количество фильтров может быть много больше двух; в радиолокаторах с активной антенной решеткой один или два фильтра могут потребоваться между каждым мощным выходным устройством и элементом антенны или подрешеткой, которую он питает. В общей сложности могут потребоваться тысячи фильтров.

Стоимость этих фильтров в денежном выражении может быть значительной, поскольку для работы с высокими мощностями и обеспечения должного подавления сигнала в широкой полосе частот иногда необходимы нетрадиционные фильтры, требующие создания повышенного давления или наоборот разрежения. Использование таких фильтров также оказывает влияние на характеристики радиолокационных систем. Потери, вносимые фильтрами для подавления гармоник на передатчике и полосовыми фильтрами на выходе радиолокатора, в этих полосах колеблются в пределах от 0,1 до 0,7 дБ. Если требуются оба фильтра, и полосовой и для подавления гармоник, то в первом приближении вносимые потери удваиваются. Из-за большого числа переменных, влияющих на работу радиолокатора, сопутствующее ухудшение характеристик обнаружения и слежения обычно проходит незамеченным, однако факт остается фактом, что даже потери порядка 0,2 дБ ведут к существенным потерям РЧ мощности (например, на величину порядка 47 кВт от максимальной мощности для радиолокатора мощностью 1 МВт). При этом для того, чтобы компенсировать ухудшение рабочих характеристик, необходимо использовать намного более мощный передатчик, поскольку приходится предполагать, что более экономичные способы улучшения характеристик уже использованы. Например, потери 0,4 дБ соответствуют уменьшению диапазона обнаружения на 2,3, что несущественно для большинства радиолокаторов, а для некоторых весьма существенно. Коэффициент стоячей волны по напряжению для фильтров обоих типов лежит в диапазоне от 1,1 до 1,3%.



Далее, способность выдерживать определенный уровень мощности, размеры и вес фильтра являются факторами, которые необходимо учитывать при оценке пригодности выходного фильтра для радиолокаторов, особенно подвижных. Размеры и вес могут стать доминирующими факторами в случае подвижных радиолокаторов с активными антенными решетками. Близость диапазонов фильтрации к рабочим диапазонам радиолокаторов требует, чтобы границы избирательной способности были крутыми, а это значит, что необходимо аккумулировать большое количество энергии, что ведет к возрастанию риска пробоя (или понижению уровня выдерживаемой мощности) и может, кроме того, способствовать фазовому искажению в полосе пропускания – другое важное соображение для радиолокаторов с активной антенной решеткой. Чем больше мощность радиолокатора, тем больше требуемая степень ослабления для подавления побочных излучений до заданного уровня, а значит тем больше фильтров необходимо использовать, а это ведет к возрастанию вносимых потерь, размеров и веса.

Фильтры на передатчике лучше всего планировать в процессе исходного проектирования радиолокатора. Во многих случаях оснащение уже существующих радиолокаторов дополнительными фильтрами на передатчике приводило к минимальным изменениям их рабочих характеристик, но были и другие случаи, когда при добавлении полосового фильтра, подавляющего излучения в смежной полосе, возникали проблемы, связанные с пробоем.

## **6 Тенденции в развитии радиолокаторов**

Основные перспективные области, влияющие на выбор выходных устройств для радиолокаторов, это:

- цифровая обработка сигнала радиолокатора, которая ведет к быстрому увеличению количества доплеровских радиолокаторов, требующих высокой импульсной когерентности (выходные устройства с прямолинейным электронным потоком и твердотельные выходные устройства),
- разработка более мощных передатчиков на твердотельных элементах (модульно/бутылочная и распределенная (фазированная антенная решетка) конфигурации),
- разработка магнетронов на базе новой технологии, специально созданной для уменьшения нежелательных излучений, которая также приводит к значительному увеличению срока службы по сравнению со старыми традиционными типами.

Эти тенденции будут оказывать влияние на уменьшение уровней нежелательных излучений нового поколения радиолокаторов.

---