

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ БЫСТРОПЕРЕСТРАИВАЕМОГО МАГНЕТРОНА

ВЫСОКАЯ ТОЧНОСТЬ, ПРОСТОТА КОНСТРУКЦИИ, НИЗКАЯ СТОИМОСТЬ

М.Зыбин

Высокоэффективные РЛС на базе мощных широкополосных ЛБВ и клистронов в военной технике незаменимы. Но из-за высокой стоимости и сложности подобные системы не пригодны для гражданского применения, где важную роль играют цена и длительная безотказная работа устройства.

Поэтому в таком оборудовании широко используются РЛС на базе магнетронов с фиксированной или быстроперестраиваемой частотой. Но и здесь те же проблемы – повышение точности, долговечности, безотказности, снижение стоимости. Решить их позволит предлагаемая система управления частотой быстроперестраиваемого магнетрона. Магнетроны с такой системой управления могут найти широкое применение в самых разнообразных локаторах – от обзорных РЛС и систем морских и речных судов, самолетов и вертолетов до РЛС картографирования местности, метеорологических и экологических исследований. В чем же особенности и достоинства системы управления частотой?

Постановка задачи. Быстроперестраиваемые (частотоподвижные) РЛС и РЛС, работающие с одной или несколькими фиксированными частотами, на базе частотоподвижных магнетронов имеют ряд преимуществ перед РЛС на базе магнетронов с фиксированной частотой. К ним относятся:

- низкие флуктуации сигнала, отраженного от цели, за счет его декорреляции. Благодаря этому частота возникновения ошибок сопровождения цели снижается в два-четыре раза;
- увеличение дальности РЛС по мощности на 4-8 дБ за счет декорреляции сигнала;

- исключение помех от сигналов прежних периодов;
- возможность выбора рабочей частоты, на которой помехи минимальны;
- высокая устойчивость к активным помехам, благодаря непредсказуемости частоты каждого следующего импульса.

Но и РЛС на базе частотоподвижных магнетронов с непрерывной периодической перестройкой частоты не лишены недостатков. Главный из них – сложность и невысокая точность предсказания частоты каждого следующего ВЧ-импульса, генерируемого магнетроном.

Известны несколько методов предсказания и обеспечения желаемой частоты каждого импульса магнетрона. Первый предусматривает подстройку частоты магнетрона по данным о частоте предшествующих импульсов [1]. Достоинство этого метода – возможность применения высокостабильного гетеродина, работающего на фиксированной частоте. Главный недостаток – инерционность механизма перестройки частоты магнетрона и привода этого механизма. Откорректировать частоту можно только за время прохождения нескольких импульсов. Поэтому быстрые изменения частоты магнетрона, связанные с вибрацией и другими дестабилизирующими факторами, могут существенно влиять на точность предсказания частоты. Второй метод – подстройка частоты гетеродина на основе данных о частоте предыдущего импульса магнетрона [2]. Этот метод менее инерционен, но, как и предшествующий, не обеспечивает точного предсказания частоты при вибрациях и других воздействиях в паузе между импульсами. Кроме того, в этом случае нельзя использовать высокостабильный гетеродин с фиксированной частотой.

Третий метод основан на использовании нескольких высокостабильных гетеродинов с фиксированной частотой. Магнетрон включается в момент, когда возможно обеспечение необходимой промежуточной частоты РЛС [3]. Достигается это путем изменения напряжения питания привода механизма перестройки частоты в соответствии с данными о частоте предыдущего импульса. Однако и в этом случае на точность предсказания частоты каждого последующего импульса влияют изменения частоты магнетрона, вызываемые воздействием дестабилизирующих факторов в паузе между импульсами.

Очевидно, более совершенны методы слежения за частотой магнетрона в паузе между импульсами. Зачастую частота определяется

Представляем автора статьи

ЗЫБИН МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ, Кандидат технических наук, главный специалист ОАО "Плутон". Возглавляет разработку магнетронов. Имеет более 50 научных трудов, в том числе 12 изобретений. На Всемирном Салоне изобретений в Брюсселе "Эврика-97" его работа "Быстроперестраиваемый магнетрон" награждена золотой медалью. Работа "Система управления частотой быстроперестраиваемого магнетрона" отмечена серебряной медалью на Всемирной выставке изобретений "Женева-2000". Контактный телефон: (095) 917-8767

по положению подвижного элемента механизма перестройки частоты магнетрона. Однако датчики положения перестраиваемого элемента, как правило, фиксируют его перемещение в одном "главном" направлении. Реально же, например при вибрации, на частоту магнетрона влияют и перемещения (перекосы) перестраиваемого элемента в других направлениях, а также перемещения других элементов конструкции, например катода (особенно в магнетронах мм-диапазона длин волн). Лучшие результаты получены при слежении за "холодной" частотой магнетрона с помощью специального маломощного сигнала, подаваемого на его вход в паузе между импульсами [4]. Запуск модулятора и магнетрона при этом производится в момент, когда достигается предсказанная или желаемая "холодная" частота магнетрона. Высокую точность слежения за "холодной" частотой магнетрона и совпадения предсказываемой и реальной частот обеспечивают два дополнительных метода коррекции частоты. Их применение позволяет более точно предсказывать значение выходной частоты магнетрона, чем при подстройке предполагаемой частоты только по частоте предыдущего импульса. Однако это усложняет конструкцию и ухудшает надежность магнетрона. К тому же, точность определения момента совпадения "холодной" частоты магнетрона и частоты маломощного гетеродина низка. Применение дополнительных методов коррекции частоты последующего импульса по частоте предыдущего может в некоторых случаях привести даже к снижению точности предсказания частоты магнетрона. Кроме того, из-за необходимости быстрого изменения частоты гетеродина во время паузы между импульсами нельзя применить более стабильные гетеродины с фиксированной частотой.

И наконец, системы слежения и коррекции частоты достаточно сложны, что дополнительно ухудшает надежность системы предсказания частоты магнетрона.

Из краткого рассмотрения методов управления частотой магнетрона можно сделать вывод о необходимости:

- построения системы управления частотой на основе точного определения частоты магнетрона в момент его запуска;
- применения в системе управления частотой только высокостабильных гетеродинов с фиксированными частотами;
- задания момента запуска магнетрона непосредственно на основе его частоты без использования сложных и сомнительных по качеству корректировок;
- обеспечения полного (а не приближенного) совпадения фиксированной частоты гетеродина с "холодной" частотой магнетрона, исключив сложные методы слежения за частотой, вносящие собственные погрешности.

Система управления частотой перестраиваемого магнетрона. С учетом выявленных недостатков существующих РЛС была поставлена и успешно решена задача построения простой и



Рис. 1. Система управления частотой быстроперестраиваемого магнетрона

эффективной системы управления частотой магнетрона (или импульсной РЛС), удовлетворяющей всем перечисленным требованиям. В простейший ее вариант входят:

- перестраиваемый магнетрон;
- модулятор, формирующий импульсы напряжения питания магнетрона;
- маломощный источник СВЧ-сигнала, подаваемого на магнетрон в паузе между импульсами;
- преобразователь, способный принимать отраженный от магнетрона маломощный сигнал и преобразовывать его в сигнал запуска модулятора в момент совпадения частот маломощного источника и колебательной системы магнетрона (рис. 1).

В начале работы модулятор устанавливается в режим ожидания импульса запуска и на вход механизма перестройки частоты магнетрона подается напряжение питания. Это приводит к перестройке частоты колебательного контура магнетрона. Затем включается маломощный СВЧ-источник, фиксированный по частоте сигнал которого через циркулятор передается на магнетрон, отражается от него и поступает в преобразователь сигнала. При совпадении резонансной частоты колебательного контура магнетрона с частотой СВЧ-источника амплитуда отраженного от магнетрона сигнала уменьшается. Благодаря этому отраженный от магнетрона сигнал можно преобразовать в сигнал запуска модулятора, связанный по времени с моментом совпадения частот маломощного источника и колебательной системы. По сигналу запуска модулятор формирует импульсы напряжения питания магнетрона, мощный СВЧ-импульс которого излучается через антенну в направлении "объекта". Этот же сигнал переключает, при необходимости, частоту маломощного источника сигнала. Следующий цикл работы РЛС вновь начинается с совпадения частот колебательного контура магнетрона и маломощного источника.

Частота сигнала, излучаемого РЛС, не зависит от влияния дестабилизирующих факторов и определяется только частотой маломощного источника и разностью частот колебательного контура магнетрона и генерируемого магнетроном СВЧ-импульса. Эти достоинства остаются неизменными и при работе РЛС на одной час-

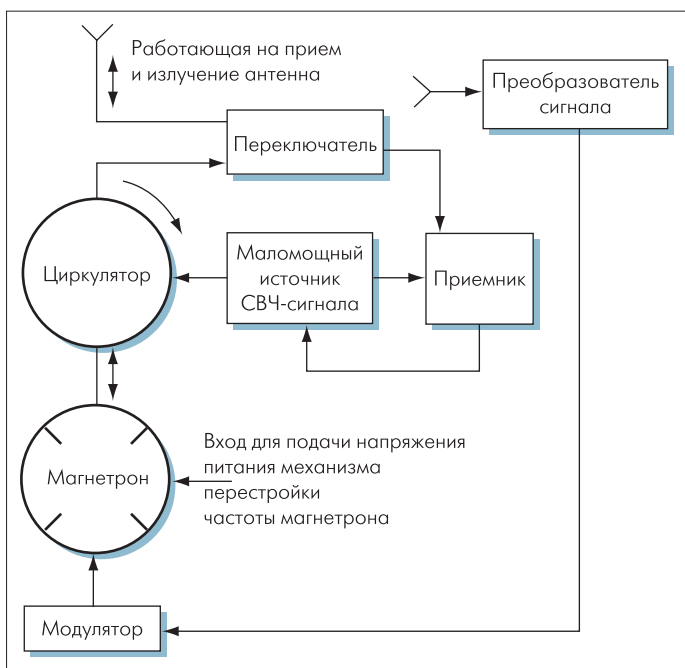


Рис.2. Работающая на прием и излучение сигнала импульсная РЛС на базе быстроперестраиваемого магнетрона с системой управления частотой

тоте, поскольку любые дестабилизирующие факторы практически не влияют на частоту.

Более сложная РЛС, включающая также приемник отраженного от цели сигнала [5], содержит разрядник антенного переключателя, регулирующий прохождение сигнала магнетрона к антенне, сигнала, отраженного от цели, в приемник и сигнала маломощного генератора, отраженного от магнетрона, в преобразователь (рис. 2). В такой РЛС антенна работает как на излучение, так и на прием. Высокостабильный генератор одновременно выполняет функции гетеродина приемника. После поступления отраженного от цели сигнала приемник выдает сигнал переключения частоты генератора. Система управления частотой магнетрона та же, что и в РЛС на рис. 1. К ее преимуществам перед лучшими известными системами относятся:

- более простая конструкция и низкая стоимость;
- возможность управления частотой с помощью высокостабильного фиксированного маломощного генератора, выполняющего одновременно функции гетеродина приемника;
- чрезвычайно высокая точность предсказания частоты каждого импульса, генерируемого магнетроном, даже при воздействии дестабилизирующих факторов.

Достоинства РЛС на базе предложенной системы управления частотой. Главное, принципиальное достоинство – излучение импульса на строго заданной частоте, а не на той, что получится. Благодаря высокой точности задания частоту можно использовать как средство управления диаграммой направленности (ДН) РЛС, и соседние импульсы могут отличаться друг от друга по частоте всего на несколько мегагерц, что позволяет получать очень малый угловой сдвиг ДН. Возможности такого управления очень широки. Так, ДН можно управлять в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, в одной из которых угловое перемещение ДН может превышать 120°, а в другой – 3–4° при каждом изменении частоты на 1%. Очень важно, что для управления ДН не нужны активные элементы, а лишь пассивные высоконадежные компоненты.

Еще одно достоинство РЛС с частотным управлением ДН – безынерционность системы управления. При больших угловых размерах и высоких азимутальных скоростях цели основная составля-

ющая ошибок сопровождения – запаздывание следящего привода антенны. При частотном управлении ДН эта составляющая отсутствует, что особенно важно для посадочных локоаторов аэропортов. В ряде случаев, особенно в РЛС с обзорными вращающимися антеннами, очень эффективным может быть совмещение механического азимутального сканирования с частотным управлением лучом, что позволяет мгновенно снижать угловую скорость на нужном участке, чтобы лучше "рассмотреть" цель. Другой вариант – совмещение механического азимутального сканирования с частотным сканированием по углу места.

Ограничения в использовании частотного управления ДН РЛС не связаны с системой управления частотой магнетрона и определяют непосредственно его характеристиками. Исключить противоречие между минимальным изменением угла ДН от импульса к импульсу и общим угловым обзором можно только путем увеличения числа импульсов за время прохождения магнетроном всего диапазона перестройки частоты в одном направлении. Поэтому желательно, чтобы диапазон перестройки частоты магнетрона был как можно шире, а скважность – как можно ниже.

В лучшей известной современной системе управления частотой используются две системы дополнительной коррекции частоты магнетрона и сложная система слежения за его "холодной" частотой [4]. К тому же, в паузах между импульсами система слежения и перестройки частоты гетеродина испытывает активные многократные воздействия, а при частоте повторения импульсов 10000 Гц (типичное значение) за 1000 часов должны пройти $36 \cdot 10^9$ импульсов. При таком числе циклов слежения за частотой магнетрона вероятность отказа очень велика. Но сегодня 1000-ч долговечность совершенно недостаточна для магнетронов гражданского назначения. Например, долговечность магнетрона, используемого в РЛС речных и морских судов, должна быть не менее 5–10 тыс. ч. Таким образом, РЛС с такими системами управления нельзя считать достаточно надежными. Применение в РЛС новой системы управления частотой, в которой отсутствуют ненадежные элементы слежения за частотой и другие сложные компоненты, позволяет значительно повысить надежность РЛС.

Упрощение системы управления частотой и применение одного высокостабильного гетеродина как для запуска магнетрона, так и для обработки принятого сигнала обеспечивает и значительное снижение стоимости РЛС. А ведь сегодня именно цена – один из главных показателей, от которого зависит успех изделия на рынке. Преимущество по техническим и эксплуатационным характеристикам наряду с низкой ценой, определяемой простотой конструкции, создают хорошие условия для продвижения РЛС с новой системой управления частотой на рынок. При этом следует напомнить, что такой РЛС присущи и все перечисленные выше достоинства частотоподвижных РЛС. Кроме того, магнетронные РЛС отличаются от РЛС на ЛБВ или клистродах низкими значениями напряжения питания, высокой надежностью, низкими производственными и эксплуатационными затратами. Правда, частотоподвижные магнетронные РЛС не могут конкурировать по техническим характеристикам с РЛС на базе мощных широкополосных ЛБВ или клистронов, работающих в квазинепрерывном режиме с внутримпульсной частотной модуляцией, в которых используются когерентная обработка сигнала, "сжатие" импульсов и фазированные антенные решетки с большим числом ячеек. Поэтому РЛС на ЛБВ или клистродах высокоэффективны и незаменимы только в военной технике и в большинстве случаев неконкурентоспособны в гражданском оборудовании, для которого первостепенное значение имеют цена и продолжительная безотказная работа.



Таким образом, для применения новой системы управления частотой перестраиваемого магнетрона наиболее перспективны РЛС следующих типов:

- обзора акватории морских и речных портов;
- морских и речных судов;
- обзора летного поля аэродромов;
- обзорные и посадочные РЛС аэродромов;
- самолетов и вертолетов;
- для картографирования местности;
- для метеорологических и экологических исследований.

РЛС обзора акватории морских и речных портов, а также обзора летного поля аэродромов обычно имеют узкую в азимутальном направлении и широкую в направлении угла места ДН, поскольку в таких РЛС угол места однозначно определяется дальностью. Широкая ДН приводит к большим бесполезным затратам энергии, но для получения более узкой ДН необходимо дополнительное механическое сканирование по углу места, что сложно и дорого. Замена неперестраиваемого магнетрона перестраиваемым с новой системой управления частотой позволяет проводить частотное сканирование по углу места без каких-либо серьезных производственных и эксплуатационных затрат. Если же использовать частотное управление ДН в азимутальном направлении, можно замедлить скорость прохождения ДН над целью и тем самым существенно увеличить суммарную энергию отраженного от цели сигнала. При этом следует помнить, что в сравнении с одночастотной РЛС дальность частотоподвижной РЛС значительно больше, а флуктуации сигнала цели меньше.

В РЛС речных и морских судов частотное управление ДН наряду с улучшением энергетических характеристик позволяет компенсировать влияние бортовой и килевой качки и расширить области обзора по углу места, вплоть до борта судна. Это облегчит причаливание судов в сильном тумане.

Обзорные РЛС аэродромов с вращением антенны в азимутальном направлении и частотным сканированием в направлении угла места конструктивно проще и дешевле существующих локаторов этого типа. Им практически не свойственны ошибки запаздывания. Благодаря декорреляции сигнала и снижению флуктуаций сигнала цели дальность обнаружения больше, а угловые и радиальные ошибки меньше, чем при использовании одночастотных РЛС с механическим сканированием в двух плоскостях. Важные достоинства посадочных РЛС аэродромов и самолетов с предлагаемой системой управления частотой перестраиваемого магнетрона – отсутствие ошибок, связанных с запаздыванием следящего привода, высо-

кая точность слежения за курсом самолета и достаточно низкая стоимость. В бортовых посадочных РЛС самолетов можно вообще отказаться от механического сканирования.

Достоинства РЛС для картографирования местности, обзорных локаторов, в том числе и самолетов, те же, что и у локаторов морских и речных судов, портов и аэродромов. Но при этом РЛС, расположенные на подвижных объектах, в ряде случаев могут с помощью частотного управления корректировать направление ДН в соответствии со скоростью транспортного средства или с какой-либо заданной программой.

Один из лучших на сегодняшний день быстроперестраиваемых мощных 8-мм магнетронов для предлагаемой системы управления частотой – МИ-457, разработанный ОАО "Плутон", г. Москва*. Его диапазон перестройки частоты – 1000 МГц, КПД – около 35% (очень высокий для 8-мм диапазона), средняя скважность – 500. В пачечном режиме скважность в каждой пачке равна 50. Изменение угла ДН от импульса к импульсу при малых углах обзора составляет 0,02–0,050 в зависимости от условий применения, при углах обзора более 90° – около 1°. Это среднее значение за пачку импульсов. При необходимости на отдельных участках обзора изменение угла ДН может быть меньше средних значений. Систему управления частотой можно быстро устанавливать в ранее разработанных РЛС, работающих на одной или нескольких фиксированных частотах. При этом современные магнетроны см- и мм-диапазона могут быть безнакальными, а их долговечность может превышать 10 тыс. ч. Возможно создание и более сложных моноблоков для когерентных РЛС с усилением 20 дБ в 8-мм диапазоне при выходной мощности 50–100 кВт, КПД 35–40% и диапазоном перестройки частоты более 500 МГц.

На созданную систему управления частотой получены патенты РФ и США [5,6], а также подана заявка на изобретение в Европатент (ведущие страны).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 4001825 США. Приоритет 14. 06. 74.
2. Пат. 4071844 США. Приоритет 16. 04. 76.
3. Пат. 4538149 США. Приоритет 18. 01. 82.
4. Европатент 0276885. Приоритет 28. 01. 87.
5. Пат. 2106654 РФ. Приоритет 15. 10. 96.
6. Пат. 6,195036 США. Приоритет 15.10.96.

* ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 1999, №1, с.12.

IBM – опять впереди планеты всей

Еще один рекорд

Ученые фирмы IBM сообщили о создании биполярного SiGe-транзистора на гетеропереходах (НВТ) с предельной частотой 210 ГГц (чип на базе таких транзисторов сможет поддерживать в широкополосной системе связи скорость передачи данных до 100 Гбит/с). Таким образом, разработчики IBM опровергли общепринятое мнение, что 100 ГГц – предельно возможное значение частоты кремниевых устройств.

Высокое быстродействие достигнуто за счет уменьшения вертикальных размеров структуры: с помощью процесса низкотемпературной

эпитаксии разработчикам удалось вырастить SiGe-пленки толщиной всего 0,05 мкм. Транзистор выполнен по 0,18-мкм технологии. НВТ планируется объединить с КМОП-логическими устройствами (всего, по расчетам разработчиков, удастся разместить на чипе до 100 тыс. транзисторов). В дальнейшем фирма намерена изготавливать НВТ по 0,13-мкм технологии.

Фирма предполагает выпустить транзистор на рынок приборов для волоконно-оптических средств связи в 2003 году.

www.eetimes.com/story/OEG20010625S0015

Система-на-кристалле

Все для Интернета

Фирма Intel в начале мая 2001 года объявила о создании так называемой "беспроводной Интернет-системы-на-кристалле". Чип содержит сигнальный процессор, флэш-память и процес-

сорное ядро. Быстродействие системы должно составить 1 ГГц, длительность работы при батарейном питании – один месяц.

e-inSITE.net,5/21/01