

И.Н.Бондаренко

КРИОГЕННЫЕ РЕЗОНАТОРЫ В ДОППЛЕРОВСКИХ РЛС НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены возможности использования охлаждаемых и сверхпроводящих резонаторов для улучшения характеристик доплеровских РЛС непрерывного излучения. На основании теоретических и экспериментальных оценок показано, что достигается снижение частотной модуляции (ЧМ) шума в спектре сигнала СВЧ генератора вблизи несущей частоты (30-1000 Гц) до значений $\sim 100-130$ дБ/Гц, а также подавления сигналов на частоте передатчика, проникающих на вход приемника, на 80-90 дБ с потерями на частотах наблюдения малоскоростных целей, не превышающими 3-10 дБ. Описаны практические схемы СВЧ генератора со сниженными ЧМ шумами и режекторного СВЧ фильтра на основе сверхпроводящего резонатора.

Традиционно основными направлениями совершенствования доплеровских РЛС являются: улучшение спектра сигналов задающего генератора и гетеродина, обеспечение эффективной частотной фильтрации, минимизация сигналов несущей частоты, непосредственно просачивающегося на вход приемника и отраженных от близкорасположенных объектов [1].

Так, например, при чувствительности приемника 10^{-16} Вт, мощности передатчика 1 кВт и развязке между антеннами 80 дБ отношение мощности частотного шума к средней мощности передатчика должно быть $P_{ш} / P_c < -110$ дБ/Гц на частоте сигнала от цели. Такая величина частотных шумов вблизи центральной частоты генерации ($F_m = 10^2-5 \cdot 10^3$ Гц) может быть получена в генераторах СВЧ только при использовании систем стабилизации. Однако, большинство систем стабилизации позволяют снизить частотные шумы не более, чем на 2-3 порядка [2].

На вход приемника будет попадать часть мощности передатчика $P = 10^{-5}$ Вт, что в 10^{11} раз выше его чувствительности. В этом случае необходимо принимать меры против перегрузки смесителя и обеспечивать при наблюдении малоскоростных целей узкополосную фильтрацию вблизи сиг-

нала несущей частоты (центральной частоты спектра сигнала передатчика) и узкополосную режекцию сигнала передатчика вблизи доплеровских частот. Непосредственная фильтрация в СВЧ диапазоне осуществляется с помощью СВЧ фильтров на основе различных резонансных элементов, наиболее узкополосными из которых являются фильтры на объемных резонаторах [3]. Поскольку добротности объемных резонаторов в схемах фильтров составляют величины $\sim 10^3$ - 10^4 , их полосы пропускания или подавления для частоты ~ 10 ГГц соответственно 10^6 - 10^7 Гц, что заведомо не подходит для обнаружения малоскоростных объектов. Динамические устройства компенсации сигнала передатчика, просачивающегося в приемник, позволяют снизить его уровень не более, чем на 10-20 дБ [1, 4].

Таким образом, применяемые в настоящее время методы не приводят к существенному улучшению характеристик доплеровских РЛС с непрерывным излучением.

Целью данной работы является оценка возможностей использования криогенных резонаторов в доплеровской радиолокации, определение основных направлений их применения и требований к практическим устройствам с криогенными резонаторами.

Охлаждаемые и сверхпроводящие резонаторы благодаря своим уникальным характеристикам ($Q = 10^5 \dots 10^{11}$, ТКЧ = $10^{-7} \dots 10^{-9} \text{ K}^{-1}$) позволяют не только улучшить долговременную стабильность частоты генераторов СВЧ ($\delta f \cong 10^{-9} \dots 10^{-14}$), но и существенно снизить интенсивность ЧМ шума в спектре СВЧ сигнала [5].

Пользуясь соотношениями из [2, 6]

$$S_{\varphi}(F) = \left(\frac{f_0}{F} \right)^2 \frac{kT}{2P_p \cdot Q_{вн} \cdot Q_{н}}; \quad (1)$$

$$\gamma_f(F) = 10 \lg[S_{\varphi}(F)\Delta F], \quad (2)$$

($S_{\varphi}(F)$ – спектральная плотность фазовых флуктуаций в одной боковой полосе; f_0 – рабочая частота; F – частота модуляции; k – постоянная Больцмана; T – температура, К; P_p – рассеиваемая мощность; $Q_{вн}$ и $Q_{н}$ – внешняя и нагруженная добротности) для сигнала резонансного источника, возмущенного внутренним тепловым шумом, можно оценить величину $\gamma_f(F)$ (отношение мощности частотного шума в боковой полосе ΔF к мощности несущей частоты, в дБ).

Задаваясь $f_0 = 10$ ГГц, $\Delta F = 1$ Гц, $P_p = 10^{-3}$ Вт для сверхпроводящих ре-

зонаторов (СПР) получим: 1) $T = 1,1 \text{ К}$, $Q_{\text{ВН}} = 10^{10}$, $Q_{\text{Н}} = 5 \cdot 10^9 - \gamma_f$ (10 Гц) $\sim -218 \text{ дБ}$, γ_f (10^2 Гц) $\sim -238 \text{ дБ}$, γ_f (10^3 Гц) $\sim -258 \text{ дБ}$; 2) $T = 4,2 \text{ К}$, $Q_{\text{ВН}} = 2 \cdot 10^7$, $Q_{\text{Н}} = 10^7 - \gamma_f$ (10 Гц) $\sim -158 \text{ дБ}$, γ_f (10^2 Гц) $\sim -178 \text{ дБ}$, γ_f (10^3 Гц) $\sim -198 \text{ дБ}$.

Полученные значения характеризуют чрезвычайно высокую спектральную чистоту сигнала СПР и могут быть взяты как предельные для генератора с СПР. Однако в реальной системе стабилизации СПР может выступать в роли как бы фильтра для тепловых шумов стабилизируемого генератора, полупроводникового или электронного типа. В этом случае температура источника при проведении оценок должна быть взята, например, для СВЧ генератора электронного типа $\sim 10^4 \text{ К}$. Тогда при $Q_{\text{ВН}} = 2 \cdot 10^7$, $Q_{\text{Н}} = 10^7$ получим γ_f (10 Гц) $\sim -125 \text{ дБ}$, γ_f (10^2 Гц) $\sim -145 \text{ дБ}$, γ_f (10^3 Гц) $\sim -165 \text{ дБ}$.

Значения величин $\gamma_f(F)$, оцененные с помощью (1) и (2), характеризуют только тепловые шумы в частотном спектре сигнала и не учитывают других видов шумов, специфических для различных источников СВЧ колебаний.

В работе [7] проведено сравнение результатов, достигнутых в улучшении спектральных характеристик сигналов СВЧ генераторов, стабилизированных различными системами стабилизации с СПР и экспериментально измерены значения частотных шумов в полосе частот 30-1000 Гц от несущей при использовании различных систем стабилизации с одинаковыми характеристиками СПР ($Q \sim 10^7$ при 4,2 К). Показано, что в зависимости от типа системы стабилизации (автогенератор на ЛБВ с СПР, система стабилизации отражательного клистрона внешним СПР, включенным на отражение, система АПЧ с СПР и система стабилизации внешним СПР, совмещенная с АПЧ) подавление частотных шумов составляет от 60 до 105 дБ/Гц на расстоянии 30 Гц от несущей и 120-140 дБ/Гц на расстоянии 10^3 Гц . При этом лучшее подавление частотных шумов вблизи несущей частоты обеспечивает система с АПЧ, а на частотах $\sim 10^3 \text{ Гц}$ – система стабилизации внешним резонатором и автогенератор на ЛБВ. При использовании СПР коэффициент стабилизации системы АПЧ может достигать значений 10^5 и выше, а при стабилизации внешним резонатором коэффициент стабилизации определяется отношением добротностей стабилизирующего резонатора и контура генератора и может составлять $\sim 10^4$ - 10^6 [5]. Поскольку воздействие системы стабилизации на величину ЧМ шумов обратно пропорционально квадрату коэффициента стабилизации, то может быть достигнуто ослабление мощности шумов на 80-100 дБ, т. е. до значений $\sim -180 \div -200$

дБ/Гц на расстоянии $\sim 10^2$ - 10^4 Гц от центральной частоты генерации. В то же время, для лучших источников СВЧ колебаний мощность амплитудных шумов составляет величину $\sim -150 \div -160$ дБ/Гц на частотах $\sim 10^3$ Гц [1, 2].

Таким образом, дальнейшее совершенствование систем стабилизации частоты криогенными резонаторами с целью снижения ЧМ шумов может быть связано только с понижением температуры источника колебаний, стабилизирующего резонатора, увеличением добротности резонатора и уменьшением мощности сигнала, рассеиваемого в резонаторе (1).

Однако не все эти меры целесообразны и обоснованы при постановке задачи создания генераторов, предназначенных для широкого применения. Кроме того, необходимо учитывать ограничивающее воздействие АМ шумов, которое начинает сказываться при достигаемых величинах ЧМ шума, а также реалии, связанные с собственными шумами аппаратуры, сопрягаемой с такими малошумящими генераторами.

С учетом проведенных оценок, а также особенностей эксплуатации устройств со сверхпроводящими элементами, был разработан экспериментальный макет СВЧ генератора, стабилизированного СПР, предназначенный для использования в доплеровских измерительных системах.

При разработке была выбрана схема стабилизации частоты отражательного клистрона внешним СПР, включенным на проход. Это позволяет при сравнительно простом схемном решении получить значительное снижение ЧМ шумов задающего генератора, как за счет стабилизирующего воздействия СПР, так и за счет его фильтрующих свойств.

Выбор параметров стабилизирующего резонатора производился исходя из двух требований. Во-первых, необходимо было получить коэффициент стабилизации, позволяющий снизить ЧМ шумы отражательного клистрона до уровня заведомо меньшего АМ шумов, во-вторых, обеспечить эксплуатацию СПР без использования различного дополнительного оборудования, необходимого для поддержания температур ниже 4,2 К.

Нагруженная добротность стабилизирующего резонатора составляла $\sim 10^7$ при 4,2 К, выходная мощность стабилизированного генератора ~ 20 мВт, коэффициент стабилизации $\sim 8 \cdot 10^3$, полоса удержания по напряжению отражателя ~ 12 В, относительная нестабильность частоты $\sim 10^{-9}$ за час. Частотные шумы составили $-75 \div -100$ дБ/Гц на частотах 30-200 Гц и $\sim -100 \div 130$ дБ/Гц на частотах 200- 10^3 Гц. Уровень ЧМ шумов при измеренном коэффициенте стабилизации должен уменьшиться на ~ 70 -80 дБ,

однако такого улучшения характеристик не получено. По-видимому, это связано с тем, что свои ограничения накладывают АМ шумы. Тем не менее, шумы клистронного генератора снижены на 30-40 дБ.

СПР размещался в гелиевом криостате, крепившемся совместно с остальными СВЧ элементами генератора непосредственно к подвижной части антенно-фидерной системы макета доплеровского измерителя. Криостат был рассчитан на срок непрерывной работы ~ 4-5 суток с возможностью его дозаправки в процессе работы. Вес криостата в снаряженном состоянии ~ 45 кг, объем гелиевой емкости ~ 16 л.

Предварительные измерения, проведенные на доплеровском измерительном макете, показали, что его потенциал существенно возрос и уже ограничивался не ЧМ шумами задающего генератора, а собственными шумами приемного устройства. Сравнение проводилось со случаем, когда в качестве задающего генератора использовался такой же отражательный клистрон с тем же блоком питания, стабилизированный нормальнопроводящим резонатором.

Использование криогенных резонаторов открывает также новые возможности в улучшении характеристик СВЧ фильтров. В работе [8] показано, что величина затухания сигнала в системе резонатор – согласованная нагрузка для проходного резонатора определяется следующим образом:

$$L = 10 \lg \left\{ 1 - \frac{4\beta_1(1 + \beta_2)}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2} \frac{1}{\left[1 + Q_H^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]} \right\}, \text{ дБ}, \quad (3)$$

где $\beta_1 = Q_0 / Q_1$, $\beta_2 = Q_0 / Q_2$ – коэффициенты связи резонатора с линией передачи со стороны источника сигнала и нагрузки, соответственно; Q_1 , Q_2 – внешние добротности резонатора; $Q_0 = Q_H(1 + \beta_1 + \beta_2)$ – собственная добротность резонатора; Q_H – нагруженная добротность; $\Delta\omega$ – отклонение частоты сигнала от частоты резонатора ω_0 .

Максимальное затухание в такой системе будет при $\beta_2 = \beta_1 - 1$. То есть необходимо, чтобы коэффициент связи резонатора по входу был не меньше единицы ($\beta_1 \geq 1$).

Для окончательного включения резонатора

$$L = 10 \lg \left\{ 1 - \frac{4\beta}{(1+\beta)^2} \frac{1}{\left[1 + Q_H^2 \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]} \right\}, \text{ дБ.} \quad (4)$$

Задаваясь значением $Q_H \sim 10^7$ для СПР на частоте 10 ГГц, с помощью соотношения (4) можно определить, что величина затухания ≥ -3 дБ достигается в полосе частот $\sim 10^3$ Гц, а затухание ≥ -60 дБ – в полосе ~ 2 Гц. При этом значение коэффициента связи β не должно отличаться от единицы более, чем на $\pm 1 \cdot 10^{-3}$, что представляет достаточно сложную техническую задачу.

Реализация характеристик резонаторов, описываемых соотношениями (3) и (4), в практических устройствах затруднена, поскольку в большинстве схем режекторных фильтров используется такое подключение резонаторов к передающей линии, которое может быть представлено как параллельное или последовательное включение соответственно последовательного или параллельного резонансного контура [9]. В связи с этим, наиболее оптимальным способом, позволяющим полнее использовать свойства одиночного резонатора, является схема включения резонатора между источником сигнала и нагрузкой с помощью ферритового циркулятора. Однако, массовые образцы ферритовых циркуляторов не обеспечивают развязку лучше 30 дБ. Следовательно, несмотря на то, что характеристика фильтра будет определяться соотношениями (3) и (4), максимальное затухание, вносимое такой схемой не будет превышать 30 дБ.

В работе [8] показано, что характеристики схемы СВЧ фильтра с ферритовым циркулятором можно существенно улучшить и привести к описываемым соотношениями (3) и (4) используя амплитудно-фазовую компенсацию. С учетом предложенных в [8] принципов был построен экспериментальный макет режекторного СВЧ фильтра с СПР [10]. Одним из наиболее ответственных элементов схемы является регулируемое устройство связи с СПР, поскольку требования к точности установки величины связи очень высоки ($\pm 10^{-3}$). Устройство регулирования связи выполнялось на основе нерегулярного запердельного волновода, внутри которого перемещалась диэлектрическая вставка, позволяющая плавно изменять степень запердельности, а соответственно и связь с резонатором [11]. Устройство регулирования связи объединялось с СПР в единую конструкцию и размещалось в

криостате. Резонатор имел нагруженную добротность $Q_H \sim 3 \cdot 10^6$ ($\beta \sim 1$) при 4,2 К. С помощью сверхпроводящего штыря, вводимого в полость резонатора, частоту можно было перестраивать в пределах ± 10 МГц при сохранении добротности. Были измерены полосы режекции $2-3 \cdot 10^3$, $1,5 \cdot 10^2$, 16 и 8 Гц при значениях режекции 3, 30, 50 и 60 дБ соответственно. Подавление сигнала на резонансной частоте фильтра составляло не менее 80-90 дБ.

При включении такого режекторного фильтра на входе доплеровского непрерывного измерителя и настройке его на частоту задающего генератора можно существенно ($-80 \div -90$ дБ) ослабить уровни сигналов, непосредственно просачивающегося с выхода передатчика на вход приемника и отраженного от неподвижных объектов, при незначительном ($\leq 3-10$ дБ) ослаблении сигналов от движущихся целей на доплеровских частотах ($F_D \geq 300$ Гц). Естественно, применение такого фильтра оправдано при достаточно малой нестабильности частоты задающего генератора ($\sim 10^{-9}-10^{-10}$) или принятии специальных мер по автоматической настройке частоты фильтра на частоту генератора. Собственная нестабильность частоты настройки фильтра с СПР, как показали эксперименты, не превышает 10^{-9} за сутки.

Анализ основного уравнения радиолокации [4]:

$$D_{\text{макс}} = 4 \sqrt[4]{\frac{P_{\text{и}} \cdot G_{\text{и}} \cdot G_{\text{п}} \cdot \lambda_{\text{и}}^2 \cdot \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 \cdot P_{\text{с мин}}}}, \quad (5)$$

(D – максимальная дальность; $P_{\text{и}}$ – мощность излучаемого сигнала; $G_{\text{и}}$, $G_{\text{п}}$ – коэффициенты усиления соответственно передающей и приемной антенн; $\lambda_{\text{и}}$ – длина волны излучаемых электромагнитных колебаний; $\sigma_{\text{ц}}$ – ЭПР цели; $P_{\text{с мин}}$ – минимальная мощность обнаруживаемого отраженного сигнала) показывает, что снижение ЧМ шумов генератора на величину 30-40 дБ в диапазоне доплеровских частот (это эквивалентно соответствующему уменьшению величины P) ведет к увеличению дальности РЛС в 6-10 раз или к возможности обнаружения цели, имеющей во много раз (10^3-10^4) меньшую ЭПР, или позволяет снизить мощность источника излучения, а значит и энергопотребление при сохранении параметров системы в целом, или уменьшить соответственно габариты передающей и приемной антенн, что в ряде случаев также немаловажно.

Кроме того, за счет сужения спектральной линии излучаемого сигнала расширяются возможности РЛС в разрешении близко расположенных целей, а также их идентификации по проявляющейся при этом тонкой струк-

туре отраженного доплеровского сигнала (составляющие вторичного доплеровского эффекта, характерные для реальной движущейся цели).

В [1] отмечается, что "вся история развития РЛС непрерывного излучения связана с непрекращающимися попытками разработки оригинальных методов обеспечения необходимой чувствительности приемников при компенсации влияния непосредственного просачивания энергии от передатчика". Данная задача, как показано выше, может быть успешно решена с помощью узкополосного режекторного фильтра с амплитудно-фазовой компенсацией, размещаемого на входе приемника и настраиваемого на частоту сигнала передатчика.

Комплексное использование такого режекторного фильтра и генератора, стабилизированного криогенным резонатором, в качестве задающего генератора и гетеродина со сниженными ЧМ шумами на доплеровских частотах, позволяет ставить вопрос о возвращении к одно-антенной конструкции доплеровского радиолокатора. Это, в свою очередь, открывает возможности повышения коэффициента усиления антенны и сужения диаграммы направленности (за счет увеличения площади антенны) и, соответственно, увеличения дальности (5) и точности определения координат.

Однако, следует отметить, что все открывающиеся перспективы в совершенствовании характеристик РЛС могут быть реализованы в полном объеме в том случае, если величина $P_{с\ мин}$ не будет ограничена параметрами приемного устройства (чувствительность, уровень собственных шумов и т.д.), о чем свидетельствуют результаты, полученные в эксперименте по применению генератора, стабилизированного СПР, в доплеровском измерительном макете. Отсюда следует, что в системах с использованием таких устройств, требования к приемной аппаратуре должны быть повышены.

Одним из основных препятствий на пути широкого использования криогенных резонаторов является необходимость поддержания в течении длительного времени низких рабочих температур. С учетом жестких требований, предъявляемых к массогабаритным характеристикам, эта задача может быть решена с помощью малогабаритных криостатов на срок работы до нескольких суток с возможностью дозаправки хладагентом из отдельного хранилища или с помощью микрохолодильных машин замкнутого цикла.

Одним из направлений, которое может дать существенный выигрыш в ресурсе работы и энергопотреблении и способствовать более широкому внедрению устройств с криогенными резонаторами, является использование охлаждаемых диэлектрических резонаторов (ОДР), изготовленных из

лейкосапфира [12–14]. При температуре кипения жидкого азота (~ 77 К) их добротности сравнимы с добротностями СПР при 4,2 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по радиолокации. Т.3. Пер. с англ. М.: Советское радио, 1979.
2. Корнилов С.А., Савшинский В.А., Уман С.Д. Шумы клистронных генераторов малой мощности. – М.: Советское радио, 1972.
3. Модель А.М. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах. – М.: Связь, 1967.
4. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. – М.: Советское радио, 1973.
5. Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Трубицын А.В. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы. – К.: Наук. думка, 1976.
6. Stein S.R. Space applications of superconductivity: resonators for high stability oscillators and other applications. – Cryogenics. 1980, v.20, n.7, pp.363-371.
7. Бондаренко И.Н., Гнесь А.С., Менде Ф.Ф. Исследование спектральных характеристик СВЧ генераторов, стабилизированных сверхпроводящими резонаторами. – Электронная техника. сер.1, Электроника СВЧ, 1982 вып.1, с.13-16.
8. Бондаренко И.Н., Гнесь А.С., Покусай В.В. Режекторные фильтры СВЧ с амплитудно-фазовой компенсацией. – Радиотехника, 1984, вып.71, с.104-108.
9. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т.2. Пер. с англ. – М.: Связь, 1972.
10. Бондаренко И.Н., Гнесь А.С. Сверхпроводящий режекторный фильтр СВЧ диапазона. – Радиотехника, 1987, вып.82, с.124-130.
11. Бондаренко И.Н., Гнесь Н.О., Гнесь А.С. Регулируемые элементы связи на основе запердельных волноводов. – Радиотехника, 1986, вып.76, с.114-119.
12. Брагинский В.Б., Панов В.И., Тимашов А.В. Аномально малая диссипация электромагнитных волн в ионном кристалле. – ДАН СССР, 1982. Т.267, № 1, с.74-75.
13. Брагинский В.Б., Багдасаров Х.С., Булыгин Ф.В., Ильченко В.С. Температурная и частотная зависимости затухания электромагнитных волн

в совершенных монокристаллах-диэлектриках. – Письма в ЖТФ, 1985. Т.11, вып.7, с.427-430.

14. Панов В.И., Станков П.Р. Стабилизация частоты генераторов высокочастотными диэлектрическими резонаторами из лейкосапфира. – Радиотехника и электроника, 1986. Т.31, вып.1, с.213-216.