

ФОРМИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ГЕТЕРОДИННОГО СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ КРИОГЕННЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Нестабильность частоты когерентного гетеродина в истинно когерентной системе и нестабильность частоты синхронизируемого гетеродина и местного гетеродина в псевдокогерентной системе влияют на эффективность работы системы селекции движущихся целей при использовании когерентно-импульсного метода радиолокации. Для повышения стабильности частоты и уменьшения числа источников нестабильности применяют различные методы стабилизации, а также системы умножения частоты стабильных низкочастотных генераторов. Однако в некоторых случаях требования, предъявляемые к источникам когерентных сигналов, могут быть противоречивыми. Например, колебательная система гетеродина, синхронизируемого импульсным сигналом передатчика, должна быть низкодобротной, и в тоже время для обеспечения высокой стабильности частоты добротность колебательного контура генератора должна быть высокой. Выполнение таких требований ведет к различным компромиссным решениям, что в конечном итоге снижает эффективность всей системы в целом.

Особенностью, несколько снижающей требования к системам стабилизации частоты в когерентно-импульсных РЛС, является необходимость обеспечения высокой стабильности, в основном, в течение интервала времени между излученным и отраженным импульсами, длительность которого обычно порядка 10^{-3} с. Такие временные интервалы сравнимы с постоянными времени сверхпроводящих высокодобротных колебательных систем.

Целью данной работы является анализ возможностей использования сверхпроводящих резонаторов (СПР) в качестве источников высокостабильных гетеродинных сигналов.

При воздействии на колебательный контур одиночного прямоугольного радиоимпульса процесс установления и затухания колебаний в контуре может быть описан соотношением [1]

$$U(t) = U_{\max} \left| \frac{1 - e^{j\tau\Delta\omega_p} e^{-\frac{\tau\omega_p}{2Q_H}}}{1 + j \frac{2Q_H\Delta\omega_p}{\omega_p}} \right| e^{-\frac{\omega_p t_1}{2Q_H}} e^{j\omega_p t}, \quad (1)$$

где $U(t)$ – текущее значение напряжения на контуре; U_{\max} – максимальное значение напряжения

на контуре; τ – длительность импульса; $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_p \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_H^2}}$ – расстройка несущей частоты

ω_0 радиоимпульса относительно частоты свободных колебаний ω_p контура, вычисленной с учетом активных потерь в нем; $t_1 = 0$ при $0 < t < \tau$, $t_1 = t - \tau$ при $t > \tau$.

Переходя к рассмотрению процесса взаимодействия одиночного прямоугольного импульса с СВЧ заполнением и объемного высокодобротного резонатора, включенного на проход, для огибающей сигнала на выходе резонатора можно записать:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \frac{1 - 2e^{-\frac{\tau\omega_p}{2Q_n} \cos(\tau\Delta\omega)} + e^{-\frac{\tau\omega_p}{2Q_n}}}{1 + Q_n^2 \left(\frac{2\Delta\omega_p}{\omega_p} \right)^2} e^{-\frac{\omega_p t_1}{Q_n}} \frac{4\beta_1\beta_2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2}. \quad (2)$$

При $\omega_0 = \omega_p$ выражение (2) преобразуется к следующему виду

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \left(1 - e^{-\frac{\tau\omega_p}{2Q_n}} \right) e^{-\frac{\omega_p t_1}{Q_n}} \frac{4\beta_1\beta_2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2}, \quad (3)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты связи с резонатором по входу и выходу.

Численные оценки, проведенные с помощью соотношения (3) при частоте 10 ГГц и добротностях резонаторов от 10^5 до 10^8 , показывают, что величина сигнала в резонаторе, отличающаяся от максимального значения не более, чем на 1%, может быть достигнута при длительностях импульсов от $2 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ с. В то же время уменьшение сигнала, излучаемого из резонатора после прекращения воздействия импульса до величин 10^{-3} - 10^{-4} от максимального значения, произойдет за интервалы времени от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ с соответственно. Видно, что при добротности резонатора $Q_n \sim 10^7$ можно обеспечить существование сигнала, достаточной для практического использования величины, в течение $\sim 10^{-3}$ с после прекращения импульса. При этом сохраняется высокая стабильность частоты сигнала, которая определяется параметрами резонатора.

В работах [2,3] показано, что, например, для цилиндрического СПР трехсантиметрового диапазона, возбужденного на виде колебаний H_{011} при $T=4,2$ К, $h=2r_0=4 \cdot 10^{-2}$ м (h, r_0 - высота и радиус резонатора), $\beta_1 = \beta_2 = 1$, $Q_n = 10^7$, можно обеспечить уровни мощностей входных сигналов 65 и 533 Вт соответственно для рабочих поверхностей из Pb и Nb. При росте добротности эти величины пропорционально уменьшаются [2].

Полученные значения представляют собой теоретический предел, который достижим при идеальной гладкости и чистоте сверхпроводящих поверхностей и мгновенном отводе тепла от них [2,3]. При реальных технологических возможностях и конечной теплопроводности эти величины будут еще на один-два порядка ниже [3].

Однако необходимо учесть, что эти значения получены в предположении непрерывного воздействия СВЧ мощности на СПР, а не для случая воздействия импульса с длительностью намного меньшей постоянной времени резонатора (типичные длительности зондирующих импульсов в РЛС $\sim 10^{-6}$ – 10^{-5} с). Это значит, что даже при подаче на вход СПР импульса с амплитудой, превышающей приведенные критические значения, напряженности полей за время импульса не успеют достичь критических значений.

С помощью соотношения (3) можно определить, что при длительности импульса $\tau = 4 \cdot 10^{-6}$ с, $P_{\text{вх}} = 10^3$ Вт, $Q_n = 10^7$, $\omega = 2\pi \cdot 10^{10}$ рад/сек, $\beta_1 = \beta_2 = 1$ выходная мощность сигнала резонатора через 10^{-3} с после окончания импульса составит 10^{-4} Вт, что достаточно для работы смесителя. При использовании усилителя для выходного сигнала резонатора величины τ и $P_{\text{вх}}$ могут быть уменьшены.

Экспериментальное исследование режима импульсной накачки СПР производилось в трехсантиметровом диапазоне с помощью установки, блок-схема которой приведена на рисунке. Цифрами на схеме обозначены: 1 – отражательный клистрон; 2 – аттенуатор; 3 – перестраиваемый фазовращатель; 4 – СПР; 5 – ферритовые вентили; 6 – амплитудный модулятор; 7, 8 – детекторные секции; 9 – двухлучевой осциллограф; 10 – блок питания клистрона; 11 – генератор импульсов.

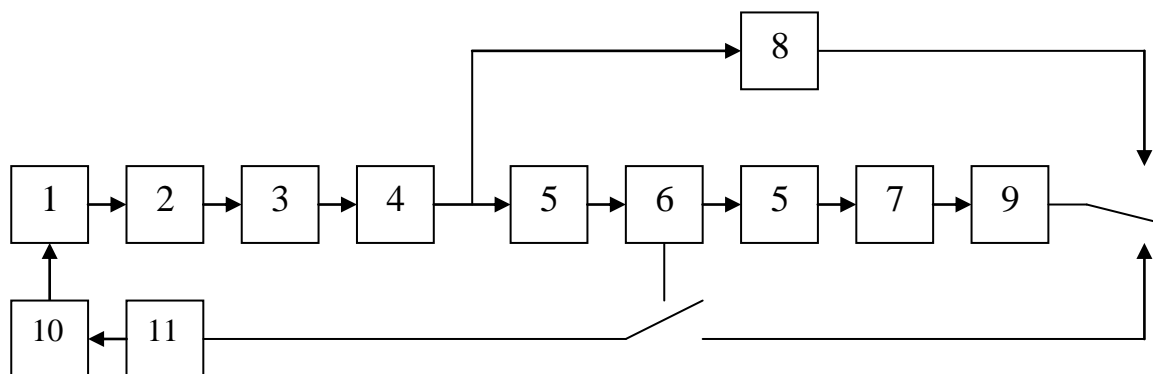


Рис.

СПР представлял собой цилиндрический резонатор, изготовленный из меди, рабочие поверхности которого покрывались слоем свинца. Резонатор помещался в устройство с волноводными регулируемыми линиями связи и герметизировался. Устройство с резонатором размещалось в криостате и охлаждалось до температуры 4,2 К. Связи с резонатором устанавливались близкими к критическим. Резонатор возбуждался на виде колебаний H_{011} и на частоте 9450 МГц имел нагруженную добротность $\sim 10^7$. С целью обеспечения работы на резонансной частоте резонатора с помощью аттенуатора и фазовращателя производилось затягивание частоты отражательного клистрона, т. е. клистрон совместно с аттенуатором, фазовращателем и СПР превращался в высокостабильный СВЧ генератор, стабилизированный внешним резонатором, включенным на проход.

Импульсные сигналы с выходов генератора импульсов подавались на отражатель клистрона и на один из входов осциллографа. Клистронный генератор настраивался таким образом, чтобы режим затягивания реализовывался только во время действия импульса. Учитывая, что переходные процессы в схеме клистрон-аттенуатор-фазовращатель-СПР определяются параметрами СПР, сигнал на выходе СПР рассматривался как импульсный сигнал, прошедший через резонатор. Сигнал с выхода СПР поступал на детекторную секцию и наблюдался на экране осциллографа, где одновременно наблюдался и модулирующий сигнал.

Поскольку клистронный генератор имел малую выходную мощность ($P_{ex} = 2 \cdot 10^{-2}$ Вт), измерения производились с длительностями импульсов $\tau = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$ с. При этом уменьшение амплитуды сигнала примерно в 10 раз фиксировалось через $3 \dots 4 \cdot 10^{-4}$ с после окончания импульса. При длительности импульса $1 \cdot 10^{-3}$ с осциллографом обнаруживался сигнал и через несколько миллисекунд после окончания модулирующего импульса.

Поскольку при практическом использовании устройства нет необходимости в сигнале, излучаемом из резонатора во время воздействия импульса, при экспериментальных исследованиях была также проверена возможность выделения сигнала, излученного после окончания импульса. Достигалось это путем включения после резонатора амплитудного модулятора, на который подавался синхронно с модулирующим запирающий импульс такой же длительности (см. рис.). При этом на экране осциллографа наблюдался затухающий сигнал. Изменяя длительность или вводя задержку запирающего импульса, удавалось выделить участки излучаемого из резонатора сигнала для различных интервалов времени после окончания модулирующего импульса.

Результаты экспериментов подтверждают справедливость соотношения (3), описывающего процесс прохождения импульсного СВЧ сигнала через высокодобротный резонатор, а также возмож-

ность использования СПР в режиме импульсной накачки в качестве источника гетеродинного сигнала в когерентно-импульсной системе. Преимуществом такого устройства по сравнению с синхронизируемым генератором является также более низкий уровень собственных шумов, обусловленный отсутствием активных элементов.

Предложенное устройство может быть эффективно использовано в когерентно-импульсных РЛС для формирования гетеродинного сигнала, когерентного с сигналом, излучаемым передатчиком. При длительностях сигнала, излучаемого из СПР $\sim 10^{-3}$ с, такое решение может быть применено при работе на дальностях до цели ~ 150 км; в случае использования малошумящего СВЧ усилителя возможно увеличение дальности.

Для его реализации необходимо проведение работ, связанных с сопряжением со стандартной аппаратурой РЛС и, возможно, некоторым повышением стабильности частоты генератора передатчика, поскольку необходимые длительности излучения сигнала из СПР могут быть обеспечены при его добротностях $\sim (10^6 - 10^7)$.

Список литературы: 1. Капанов М.Р., Левин М.А. Автоматическая подстройка частоты. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 320 с. 2. Бондаренко И.Н. Накопление электромагнитной энергии в сверхпроводящем резонаторе // Збірник наукових праць. Харків. ХВУ. 2000. Вип.2(28). С.24-30. 3. Бондаренко И.Н. Основные факторы, ограничивающие предельные значения электромагнитных полей в сверхпроводящих резонаторах // Вісник Харк. нац. ун-ту. № 467. Радіофізика та електроніка. 2000. Вип.1. С.124-135.

Харьковский институт ВВС

Поступила в редколлегию 17.05.2001