

Эффективность несимметричной модуляции спектрально-селективного радиометра

© Н. Е. Кольцов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Проблема. На радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» традиционные радиометры с квадратичными детекторами широкополосных шумовых сигналов заменяются спектрально-селективными радиометрами, которые обеспечивают высокую точность радиометрических измерений энергетических параметров радиоизлучения в условиях воздействия радиопомех. Эти радиометры используются при регулярных наблюдениях источников с непостоянной интенсивностью радиоизлучения и при мониторинге изменений уровней сигналов от стандартных (опорных) космических источников радиоизлучения. Для таких исследований первостепенное значение имеют чувствительность радиометра и точность измерения мощностей и шумовых температур принимаемого радиосигнала. При радиометрических измерениях приёмные устройства радиотелескопов работают в режиме модуляции меандром коэффициента усиления и генератора шума, имитирующего шум антенны, при одинаковых временных интервалах накопления принимаемого сигнала в смеси с собственными шумами радиотелескопа и только шумов радиотелескопа. Повысить чувствительность радиометра и точность измерений за счёт увеличения времени накопления сигнала не всегда возможно. Период обновления результатов радиометрических измерений, равный времени накопления сигнала, должен быть не очень большим, чтобы точнее отслеживать изменения мощности сигнала при сканировании источника излучения.

Цель. Целью статьи является выяснение возможностей повышения чувствительности радиометра и точности измерений мощности принимаемого радиосигнала за счёт несимметричной модуляции генератора шума и приёмного устройства.

Метод. Вычисляется коэффициент эффективности, равный отношению чувствительности радиометра при несимметричной модуляции к чувствительности радиометра при обычной симметричной модуляции меандром. Рассматриваются три режима работы радиометра: модуляция меандром при времени накопления шумов, превышающем интервал накопления сигнала; несимметричная модуляция при одинаковых интервалах накопления сигнала и шума; несимметричная модуляция при несимметричном накоплении.

Результат. Режим несимметричного накопления сигнала и шумов даже при симметричной модуляции приёмного устройства меандром позволяет повысить чувствительность спектрально-селективного радиометра на 21–29 % по сравнению с радиометром, работающим в обычном режиме симметричного (на одинаковых интервалах времени) накопления сигнала и шумов. Этот способ легко реализовать на радиотелескопах РТ-32. В режиме несимметричной модуляции при несимметричном накоплении можно дополнительно немного (на 3–6 %) повысить чувствительность радиометра, но это требует совершенствования модулируемых узлов приёмного устройства. Режим несимметричной модуляции при симметричном накоплении неприемлем, так как только ухудшается чувствительность радиометра.

Ключевые слова: спектрально-селективный радиометр, несимметричная модуляция радиометра, чувствительность радиометра.

Контакты: Кольцов Николай Ефимович (grenkov@iaaras.ru).

Статья поступила в редакцию 15.10.2020, принята к публикации 25.11.2020, опубликована 30.12.2020.

Для цитирования: Кольцов Н. Е. Эффективность несимметричной модуляции спектрально-селективного радиометра // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 55. С. 10–15.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.55.10-15>

Efficiency of Asymmetric Switching with a Spectrally Selective Radiometer

N. E. Kol'tsov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The problem. The RT-32 radio telescopes' traditional radiometers with square-law detectors of broadband noise signals are replaced by spectrally selective radiometers which provide high accuracy of radiometric measurements of the energy parameters of radio emission under the influence of radio interference. These radiometers are used for regular observations of cosmic emission sources with variable intensity of radio emission and for monitoring changes in signal levels from standard (reference) space radio sources. For such studies, the sensitivity of the radiometer and the accuracy

of measuring the power and noise temperatures of the received radio signal are of paramount importance. In radiometric measurements, the receivers of radio telescopes operate in the square wave modulation mode of the gain and the noise generator, thus simulating the antenna noise. Time for signal receiving (τ_s) and time for noise registration (τ_n) equal half of the switching period t_{mod} ; time for signal integration (t_s) equals time for noise integration (t_n). The radiometer must be accurate enough for investigating radio emission from remote cosmic source and to measuring a weak change of the signal power. But it is not always possible to increase the sensitivity of the radiometer and the accuracy of measurements by increasing the signal integration time. The time for signal integration t_s is limited because it denominates result updating when the source is scanning.

The aim. The purpose of the paper is to clarify the possibilities of increasing the radiometer sensitivity and the accuracy of measuring the power of the radio signal received due to the asymmetric switching on the noise generator and the receiving device.

Method. The efficiency coefficient is calculated as a ratio of the radiometer sensitivity with asymmetric switching to the sensitivity of the radiometer with the usual symmetric square wave switching. Three operating modes of the radiometer are considered: modulation by a square wave when the noise accumulation time exceeds the signal accumulation interval ($\tau_s = \tau_n$); debalanced modulation ($\tau_s > \tau_n$) with the same signal and noise accumulation intervals ($t_n = t_s$); asymmetric switching ($\tau_s > \tau_n$) with asymmetric accumulation ($t_n > t_s$).

Result. The radiometer with symmetry switching and not symmetry integration ($\tau_s = \tau_n$, $t_n > t_s$) makes it possible to increase the sensitivity of a spectrally selective radiometer (by 21–29 %) compared to a radiometer operating in the usual mode of symmetric (at equal time intervals) accumulation of signal and noise. This method is easy to implement on RT-32 radio telescopes. In the asymmetric modulation mode with asymmetric accumulation it is possible to additionally (by 3–6 %) increase the sensitivity of the radiometer but this requires the improvement of the modulation units of the receiving device. The asymmetric switching with symmetry integration ($\tau_s > \tau_n$, $t_n = t_s$) is unacceptable as the sensitivity of the radiometer is only reduced.

Keywords: the spectrum-selective radiometer, asymmetry switching, accuracy, precision and sensitivity of the radiometer.

Contacts: Nikolay E. Kol'tsov (grenkov@iaaras.ru).

Received 15 October, 2020, accepted 25 November, 2020, published 30 December, 2020.

For citation: Kol'tsov N. E. Efficiency of asymmetric switching with a spectrally selective radiometer // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 55. P. 10–15.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.55.10-15>

Введение

Параметры широкополосного радиоизлучения космических источников (мощность сигнала P_s в полосе приёма $B_{\text{пр}}$, шумовая температура T_s и спектральная плотность мощности принимаемого потока S) в течение многих лет измерялись радиометрами, принцип работы которых основан на квадратичном детектировании аналогового широкополосного шумового сигнала [1]. Непосредственное измерение мощности P_s обеспечивает радиометр модуляционного типа, в котором радиоастрономическое приёмное устройство (РПУ) содержит переключатель входа РПУ или модулятор коэффициента усиления РПУ [2] и генератор шума (ГШ), имитирующий шумы антенны. ГШ и модулятор РПУ в таком радиометре управляются меандром. В течение одних полупериодов меандра (τ_c) ГШ выключен и принимается исследуемый сигнал в смеси с шумом приёмной системы, а в течение других полупериодов ($\tau_{\text{ш}}$), когда включён ГШ и уменьшен коэффициент усиления РПУ, регистрируется шум системы. Синхронное детектирование сигнала на выходе амплитудного квадратичного детектора (АКД) и его интегрирование на заданном интервале накопления $t_{\text{нак}}$ даёт разностное напряжение, пропорциональное мощности сигнала P_s . В связи с ухудшением помеховой обстановки в диапазоне дециметровых волн [3] клас-

сические радиометры с АКД на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» заменяются помехозащищёнными спектрально-селективными радиометрами [4].

Классический радиометр с АКД и узкополосным каналом фильтрации выходного сигнала, выполненным на аналоговых элементах, имеет максимальную чувствительность именно в симметричном режиме модуляции, когда $\tau_{\text{ш}} = \tau_c$ [5]. В режиме несимметричной модуляции ($\tau_{\text{ш}} < \tau_c$) увеличивается время приёма и накопления сигнала в течение периода модуляции $t_{\text{мод}} = \tau_{\text{ш}} + \tau_c$, но в классическом радиометре с узкополосным последетекторным каналом на аналоговых элементах это приводит к снижению чувствительности и точности радиометрических измерений. Поэтому на российских радиотелескопах, которые оснащены радиометрами, построенными, как правило, по классическим схемам, режим несимметричной модуляции ещё не нашёл широкого применения.

Вместе с тем, в случае оцифровки низкочастотного аналогового сигнала на выходе АКД и последующего цифрового синхронного детектирования и накопления сигнала можно улучшить чувствительность и точность радиометра, применяя несимметричную модуляцию [6]. Такой режим работы вполне допустим и для новых помехозащищённых радиометров спектрально-селективного типа [4], которые разработаны в ИПА РАН и

введены в эксплуатацию на радиотелескопах РТ-32. В данной статье рассматриваются специфика работы и эффективность спектрально-селективного радиометра в режиме несимметричной модуляции.

Принцип действия спектрально-селективного радиометра при работе в режиме несимметричной модуляции

Спектрально-селективный радиометр (рис. 1) содержит штатное РПУ радиотелескопа с полосой пропускания $B_{пр}$, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) широкополосного шумового сигнала, высокоскоростной вычислитель спектров мощности с двухканальным накопителем спектров, счётчик вычисленных спектров, генератор модулирующих импульсов (ГМИ), которыми управляются attenuator (модулятор) РПУ и генератор шумовых пилот-сигналов — ГШ, а также компьютер радиотелескопа, регистрирующий результаты радиометрических измерений. Рассматриваемый радиометр модуляционного типа, применяемый на радиотелескопах РТ-32, может работать в режимах обычной симметричной и несимметричной модуляции, а также в режиме измерения полной мощности сигнала (без ГШ и модуляции РПУ).

Шумовой сигнал промежуточной частоты (0.1–1 ГГц на РТ-32 или 1–2 ГГц на РТ-13) считывает АЦП с тактовой частотой дискретизации $F_d = 2048$ МГц, а при наблюдениях в диапазонах волн 18, 13 и 6.2 см, где полосы пропускания РПУ не превышают 500 МГц — с частотой $F_d = 1024$ МГц. Высокоскоростной вычислитель спектров, выполненный на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), методом быстрого преобразования Фурье циклически, конвейерным способом (без потерь времени приёма сигнала) вычисляет мгновенные спектры мощности в полосе анализа $B_{ан} = 0.5 F_d$, которая равна или несколько шире полосы пропускания РПУ $B_{пр}$. Спектры, вычисляемые в течение модулирующего импульса, определяют уровень собственного шума радиотелескопа. В паузах между импульсами вычисляется спектр смеси принимаемого сигнала и шума радиотелескопа. Мгновенные спектры мощностей, вычисляемые во время модулирующих импульсов и пауз, накапливаются отдельно и затем усредняются на разных интервалах времени ($t_{нак.ш}$ и $t_{нак.с}$ соответственно). Длительности моду-

лирующих импульсов и пауз кратны периоду вычисления мгновенных спектров $t_{сп} = 1/w$, где w — интервал частотного разрешения (разнос частот спектральных компонент). В течение каждого периода модуляции $t_{мод}$ вычисляется $2m = t_{мод}/t_{сп}$ мгновенных спектров. В режиме симметричной модуляции РПУ и ГШ вычисленные спектры накапливаются и усредняются на одинаковом для обоих полупериодов модуляции времени накопления $t_{нак.ш} = t_{нак.с} = M t_{мод}$, где M — целое положительное число. За это время вычисляются и усредняются по Mm мгновенных спектров мощности, содержащих и не содержащих широкополосный сигнал исследуемого источника излучения. Время накопления, определяющее период обновления данных радиометрических измерений, должно быть достаточным для сглаживания флуктуаций измеряемых мощностей, но не слишком большим, чтобы обеспечить приемлемую точность регистрации изменений мощности радиоизлучения при сканировании источника.

При работе в режиме несимметричной модуляции период обновления данных измерений не должен увеличиваться, чтобы сохранялось прежнее качество радиометрических исследований источника излучения. В этом режиме для спектров, вычисляемых в паузах между модулирующими импульсами, время накопления $t_{нак.с} = M_c t_{мод}$ и число M_c учитываемых периодов модуляции должны оставаться прежними, но для спектров, вычисляемых во время модулирующих импульсов (при включённых ГШ и модуляторах РПУ), число $M_{ш}$ учитываемых периодов модуляции и длительность накопления $t_{нак.ш} = M_{ш} t_{мод}$ можно увеличить. Для большинства радиотелескопов, в том числе для РТ-32 и РТ-13, увеличение времени накопления $t_{нак.ш}$ допустимо, так как мощности собственных шумов радиотелескопа во время сеанса наблюдений изменяются во много раз медленнее, чем возможные изменения мощностей радиосигналов от сканируемых источников.

ГШ и attenuator РПУ включаются модулирующими импульсами длительностью $\tau_{ши}$ с периодом $t_{мод}$, которые формирует ГМИ. Фронты модулирующих импульсов синхронизированы короткими запускающими импульсами от счётчика импульсов, на который с периодом $t_{сп}$ поступают исходные синхронизирующие импульсы в моменты завершения очередных циклов вычисления мгновенных спектров мощности сигнала. Коэффициент деления частоты в счётчике импульсов переключается таким образом, чтобы получить требуемую длительность модулирующего импульса $\tau_{ши} = m_{ш} t_{сп}$, где $m_{ш}$ — целое число (в пределах от 1 до m). При этом длительность пауз между импульсами $\tau_{си} = t_{мод} - \tau_{ши} = m_c t_{сп}$, где $m_c = 2m - m_{ш}$ — число спектров, вычисляемых за время $\tau_{си}$. При $m_{ш} < m$ имеет место режим несимметричной моду-



Рис. 1. Структурная схема спектрально-селективного радиометра

ляции; при $m_{ш} = m_c = m$ — режим обычной модуляции меандром.

Как показано далее, заслуживает внимания режим несимметричного накопления сигнала и шума ($M_{ш} > M_c$ и $t_{нак.ш} > t_{нак.с}$) при модуляции РПУ меандром ($\tau_{ши} = \tau_{си}$). В этом режиме мгновенные спектры смеси принимаемого сигнала и шума радиотелескопа накапливаются и усредняются так же как в традиционных спектрально-селективных радиометрах с модуляцией меандром и симметричным накоплением [4, 7]. Период обновления измеренных мощностей сигнала равен $t_{нак.с} = M_c t_{мод}$. В рассматриваемом режиме работы радиометра мощность смеси сигнала и шума сравнивается с мощностью шума, который, в отличие от традиционных радиометров, накапливается на большем числе периодов модуляции (на увеличенном интервале накопления $t_{нак.ш} = M_{ш} t_{мод}$). Спектры шума можно усреднять простейшим способом — по пакетам из $m M_{ш}$ накопленных мгновенных спектров. При этом вычисленные значения мощности шума обновляются с периодом $t_{нак.ш} = M_{ш} t_{мод}$. Уменьшить период обновления значений мощности шума до значения $t_{нак.ш} = t_{мод}$ можно при пакетном усреднении m мгновенных спектров на каждом периоде модуляции и вторичном усреднении в скользящем окне размером $M_{ш}$. При любом из этих способов усреднения спектров шума время установления нормального режима работы после включения радиометра равно $t_{нак.ш}$. Реализация режима несимметричного накопления при модуляции РПУ меандром на РТ-32 не требует какой-либо доработки аппаратуры [4]. Нужно только уточнить компьютерную программу обработки вычисленных спектров в части усреднения спектров шума на интервале $t_{нак.ш}$.

Параметры радиометра при несимметричной модуляции

Основное препятствие применения несимметричной модуляции в радиометрах с аналоговой обработкой сигналов в последдетекторном узкополосном канале — необходимость изменения на каждом полупериоде модуляции постоянной интегрирования канала и согласования её с длительностями модулирующих импульсов ($\tau_{ши}$) и пауз ($\tau_{си}$). В спектрально-селективном радиометре такой проблемы нет, так как спектры мощности вычисляются по взаимно некоррелированным цифровым выборкам широкополосного сигнала. Здесь имеют значение только флуктуации амплитуд компонентов спектров мощностей, которые зависят от отношения сигнал/шум в широкополосном сигнале на входе радиометра, а также от чисел $m_{ш} M_{ш}$ и $m_c M_c$ усредняемых спектров мощностей, не содержащих и содержащих исследуемый сигнал.

В течение модулирующих импульсов длительностью $\tau_{ши}$, когда включён ГШ и увеличено

ослабление аттенюатора РПУ, спектрально-селективный радиометр измеряет мощность $P_{ш}$ собственных шумов радиотелескопа. В течение паузы $\tau_{си}$ между модулирующими импульсами радиометр работает как измеритель полной мощности шумового сигнала $P_c = P_s + P_{ш}$, где P_s — мощность принимаемого радиосигнала. Мощности $P_{ш}$ и P_c являются некоррелированными случайными величинами, поскольку они определены для шумовых сигналов на неперекрывающихся интервалах времени (на разных полупериодах модуляции РПУ). По разности измеренных мощностей P_c и $P_{ш}$ определяется значение P_s , которое затем пересчитывается в шумовую температуру $T_s = P_s / k B_{пр}$ принятого антенной радиоизлучения, где $K_{пр}$ — коэффициент усиления РПУ; k — постоянная Больцмана.

Чувствительность радиометра и точность измерения энергетических параметров радиоизлучения зависит от качества цифровой системы обработки сигналов, которая вычисляет квадраты напряжения (мощности) ρ_s сигнала на входе АЦП.

Поскольку СКО шумовой температуры принятого антенной сигнала σ_{T_s} пропорционально СКО σ_{ρ_s} вычисленных квадратов напряжения сигнала на входе АЦП ρ_s , качество системы можно оценивать по СКО σ_{ρ_s} и дисперсии $\sigma_{\rho_s}^2 = \sigma_{\rho_c}^2 + \sigma_{\rho_{ш}}^2$, где $\sigma_{\rho_{ш}}^2$ и $\sigma_{\rho_c}^2$ — дисперсии вычисленных мощностей шума системы и смеси сигнала с шумом. Значения $\sigma_{\rho_{ш}}^2$ и $\sigma_{\rho_c}^2$ можно определить, используя методики анализа цифровых спектрометрических систем с симметричной модуляцией [7].

Во время модулирующего импульса на АЦП поступает шумовой сигнал с дисперсией напряжения

$$\sigma_{иш}^2 = P_{ш} K_{пр} z = \frac{T_{ш} K_{пр} z}{k B_{пр}},$$

а во время паузы — с дисперсией $\sigma_{ис}^2 = (1 + g) \sigma_{иш}^2$, где z — волновое сопротивление приёмного канала; g — отношение шумовой температуры T_s принимаемого сигнала к температуре $T_{ш}$ собственных шумов радиотелескопа. При радиоастрономических наблюдениях часто не учитывают g , так как для удалённых источников $T_s \ll T_{ш}$. Если разрядности АЦП и вычислителей достаточно большие, потерями отношения сигнал/шум в цифровых преобразователях сигналов можно пренебречь. Тогда дисперсии вычисляемых мощностей $\sigma_{\rho_{ш}}^2$ и $\sigma_{\rho_c}^2$ будут равны удвоенным дисперсиям напряжений на входе АЦП [8]. Учитывая уменьшение флуктуаций мощностей сигналов в $m_c M_c$ и $m_{ш} M_{ш}$ раз при усреднении накопленных мгновенных спектров, получим выражение для СКО вычисленной мощности (квадрата напряжения) исследуемого сигнала на входе АЦП

$$\sigma_{\rho s} = \sqrt{\frac{2\sigma_{\text{ш}}^4}{m_{\text{ш}}M_{\text{ш}}} + \frac{2\sigma_{\text{ш}}^4}{m_c M_c}} = \sqrt{2} \sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{\frac{1}{m_{\text{ш}}M_{\text{ш}}} + \frac{(1+g)^2}{m_c M_c}}. \quad (1)$$

При приёме слабого сигнала ($g \ll 1$) в режиме симметричной модуляции, когда $m_c = m_{\text{ш}} = m$, $M_c = M_{\text{ш}}$ и $t_{\text{нак.с}} = t_{\text{нак.ш}} = m M_c t_{\text{сп}}$, СКО вычисленной мощности

$$\sigma_{\rho s1} = 2\sigma_{\text{ш}}^2 \sqrt{1/m M_c}. \quad (2)$$

Режим несимметричной модуляции характеризуется коэффициентом асимметрии модуляции $\gamma = m_{\text{ш}}/m$, где $0 < \gamma \leq 1$, и коэффициентом асимметрии времени накопления $\beta = M_{\text{ш}}/M_c \geq 1$. При этом $m_{\text{ш}} M_{\text{ш}} = \gamma \beta m M_c$ и $m_c = (2 - \gamma)m$, а формулу (1) при $g \ll 1$ можно представить как

$$\sigma_{\rho s} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{\text{ш}}^2}{\sqrt{m M_c}} \sqrt{\frac{1}{\gamma\beta} + \frac{1}{2-\gamma}}. \quad (3)$$

Случай $\gamma = \beta = 1$ соответствует режиму обычной симметричной модуляции радиометра, когда СКО вычисленной мощности сигнала на входе АЦП $\sigma_{\rho s1}$ определяется формулой (2). При обычном режиме модуляции меандром ($\gamma = 1$) с одинаковыми интервалами накопления шумов и сигнала ($\beta = 1$) имеем, как и следовало ожидать, $\sigma_{\rho s} = \sigma_{\rho s1}$.

Отношение $\sigma_{\rho s}/\sigma_{\rho s1}$ характеризует эффективность несимметричной модуляции радиометра. Из (2) и (3) следует

$$\frac{\sigma_{\rho s}}{\sigma_{\rho s1}} = \sqrt{\frac{1}{2\gamma\beta} + \frac{1}{2(2-\gamma)}}. \quad (4)$$

Если модуляция несимметричная ($\gamma < 1$), но накопление симметричное ($t_{\text{нак.с}} = t_{\text{нак.ш}}$ и $\beta = 1$), то из (4) следует

$$\frac{\sigma_{\rho s}}{\sigma_{\rho s1}} = \sqrt{\frac{1}{2\gamma} + \frac{1}{2(2-\gamma)}} = \frac{1}{\sqrt{\gamma(2-\gamma)}}.$$

Поскольку при $0 < \gamma < 1$ знаменатель этого выражения меньше 1, получаем $\sigma_{\rho s} > \sigma_{\rho s1}$ (потери чувствительности). Строка $\beta = 1$ в таблице подтверждает снижение чувствительности и точности радиометра в таком режиме работы.

Таблица

Значения отношений $\sigma_{\rho s}/\sigma_{\rho s1}$ при разных режимах несимметричной модуляции (γ) и накопления (β)

Асимметрия	$\gamma = 1$	$\gamma = 0.6$	$\gamma = 0.4$	$\gamma = 0.2$	$\gamma = 0.1$
$\beta = 1$	1	1.136	1.249	1.667	2.29
$\beta = 2$	0.866	0.880	0.969	1.236	1.662
$\beta = 3$	0.816	0.797	0.854	1.054	1.389
$\beta = 4$	0.791	0.752	0.791	0.950	1.230
$\beta = 5$	0.775	0.724	0.751	0.882	1.124
$\beta = 6$	0.764	0.704	0.722	0.833	1.047

Если радиометр модулируется меандром ($\gamma = 1$), но шумы системы интегрируются на увеличенном временном интервале ($\beta > 1$), то можно уменьшить отношение $\sigma_{\rho s}/\sigma_{\rho s1}$ и улучшить чувствительность и точность радиометра. При $\gamma = 1$ из (4) следует

$$\frac{\sigma_{\rho s}}{\sigma_{\rho s1}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}.$$

Поскольку $\beta > 1$, подкоренное выражение этой формулы всегда меньше 1 и $\sigma_{\rho s} < \sigma_{\rho s1}$. При $t_{\text{нак.ш}} = 4 t_{\text{нак.с}}$, например, $\sigma_{\rho s}/\sigma_{\rho s1} \approx 0.791$ и чувствительность радиометра повышается почти на 21%. При дальнейшем увеличении $t_{\text{нак.ш}}$ отношение $\sigma_{\rho s}/\sigma_{\rho s1}$ весьма медленно уменьшается, приближаясь при больших β к пределу, $1/\sqrt{2} \approx 0.707$, когда выигрыш по чувствительности достигает 29%. Улучшение чувствительности связано с тем, что при увеличении времени накопления $t_{\text{нак.ш}}$ уменьшаются СКО $\sigma_{\rho \text{ш}}$ и вклад шумов радиотелескопа в СКО вычисленной мощности сигнала $\sigma_{\rho s}$. Здесь предполагается, что время когерентного накопления шумового сигнала в спектрально-селективном радиометре больше времени интегрирования $t_{\text{нак.ш}}$, что на РТ-32 обычно выполняется, а шумы и параметры радиотелескопа стабильны в течение времени накопления шумов $t_{\text{нак.ш}}$. Разумно увеличивать время накопления шумов по сравнению с временем накопления сигнала не более чем в 6 раз, так как при дальнейшем увеличении $t_{\text{нак.ш}}$ прирост эффективности очень мал, а потери от нестабильностей могут увеличиться. В целом трудно ожидать выигрыша чувствительности более чем на 25%.

Реализации данного режима модуляции спектрально-селективного радиометра на радиотелескопах РТ-32 не требует доработки аппаратуры; достаточно скорректировать только программу обработки данных наблюдений на компьютере радиотелескопа.

Некоторое повышение чувствительности радиометра даёт и режим несимметричной модуляции ($\gamma < 1$) при асимметрии накопления ($\beta > 1$). В этом случае при заданном времени накопления $t_{\text{нак.с}}$ первое слагаемое под корнем в формуле (1) уменьшаются за счёт увеличения $M_{\text{ш}}$, а второе — за счёт увеличения m_c .

При $\beta \approx 4-6$ и умеренной асимметрии модулирующих импульсов ($\gamma \approx 0.6$) можно немного (до 6%) повысить чувствительность радиометра по сравнению с рассмотренным выше режимом несимметричного накопления при симметричной модуляции ($\beta > 1, \gamma = 1$). Для получения даже такого небольшого дополнительного выигрыша чувствительности необходимо, кроме программного обеспечения, доработать ГМИ и модуляторы ис-

пользуемого на радиотелескопах РТ-32 радиометра, чтобы минимизировать влияние переходных процессов при их переключениях. При большой асимметрии модуляции ($\gamma \leq 0.2$) дополнительного выигрыша чувствительности получить невозможно при разумном ограничении времени накопления шумов.

Заключение

Для повышения чувствительности и точности радиометра целесообразно увеличивать время $t_{\text{нак.ш}}$ распределённого накопления шумов приёмной системы. Режим несимметричного накопления сигнала и шумов даже при симметричной модуляции приёмного устройства меандром ($\beta > 1$, $\gamma = 1$) позволяет повысить чувствительность спектрально-селективного радиометра на 21–29 % по сравнению с традиционным режимом работы модуляционного радиометра. Это имеет большое значение для программ наблюдений источников слабого радиоизлучения, для регистрации небольших нестационарностей радиоизлучения и для мониторинга уровней радиоизлучения опорных источников. Такие наблюдения регулярно проводятся радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО» с использованием спектрально-селективных радиометров [9, 10]. Для реализации режима несимметричного накопления ($\beta > 1$, $\gamma = 1$) достаточно откорректировать программу обработки вычисленных спектров мощностей компьютером радиотелескопа, который регистрирует результаты наблюдений. Этот режим работы спектрально-селективного радиометра целесообразно реализовать на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО». При этом сохраняются все преимущества спектрально-селективного радиометра по защите от радиопомех.

Несимметричная модуляция ($\gamma < 1$) не даёт заметного улучшения точности и чувствительности радиометра по сравнению с режимом несимметричного накопления ($\beta > 1$).

Литература

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры / под ред. Д. В. Королькова. М.: Наука, 1973. 416 с.
2. Иванов Д. В., Ипатов А. В., Ипатова И. А. и др. Приемники радиоинтерферометрической сети Квазар // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 2. С. 242–256.
3. Андреева Т. С., Исаенко А. В., Царук А. А. и др. Помеховая обстановка в обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 48. С. 3–9.
4. Кольцов Н. Е., Гренков С. А., Федотов Л. В. Спектрально-селективные радиометры с полосами пропускания до 1 ГГц // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 66–71.
5. Кисляков А. Г., Разин В. А., Цейтлин Н. М. Введение в радиоастрономию: в 2 ч. Ч. I. М.: Физматлит, 1995. 212 с.
6. Bremer J. C. Improvement of scanning radiometer performance by digital reference averaging // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1979. Vol. 28, № 1. P. 46–54.
7. Кольцов Н. Е. Спектрометрическая система регистрации космического радиоизлучения // Известия вузов России. Радиоэлектроника. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. Вып. 2. С. 59–69.
8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники: в 2 кн. Кн. 1. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
9. Гренков С. А., Госачинский И. В., Ипатов А. В. и др. Вспышка мазера ОН в туманности W3 // Астрофизический бюллетень. 2016. Т. 71, № 3. С. 358–371.
10. Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А. и др. Спектры стандартных радиоисточников в современную эпоху // Астрономический журнал. М.: Наука, 2018. Т. 95, № 9. С. 609–618.