

ИМПУЛЬСНО-КОМПЕНСАЦИОННЫЙ РАДИОСПЕКТРОМЕТР

В. Г. Грачев, Н. Ф. Рыжков

Проведены экспериментальные исследования метода импульсной компенсации [4] на одном из действующих радиоспектрометров РАТАН-600 [2, 3], специально модернизированных с целью расширения их методических возможностей. Работа в новом режиме осуществляется путем периодического зашумления входа анализатора спектра в сочетании с импульсной компенсацией сигналов на выходе квадратичных детекторов.

Эксперименты подтвердили выводы работы [1]. Чувствительность, реализованная в наблюдениях радиогалактики Центавр А на волне 21 см в линии нейтрального водорода, лишь на 30% ниже предельной. В режиме импульсной компенсации используются стандартные выходные устройства радиометров модуляционного типа.

The experimental investigations of puls compensative method [4] is carried out at one of the working radio spectrometers of RATAN-600 [2, 3] which has been specially improved for extension of its possibilities. The new mode of operation is realized by periodical attenuation of the spectral analyzer input and the puls compensation of the square-law detector outputs.

The experiments have corroborated the conclusions of the paper [1]. The sensitivity realized in the investigations of the radio Galaxy Centaurus A in the neutral hydrogen line is only by 30 per cent lower than the limit one. The commercial outputs devices of the modulative radiometers are used in the puls compensative mode.

Возможность повышения чувствительности радиоспектрометра при переходе от модуляционного метода измерений к методу импульсной компенсации [1] наиболее удачно реализуется в радиоспектрометре двойного сравнения [2, 4]. В этом случае можно сохранить все преимущества квазиулевого модуляционного радиометра для измерений непрерывного спектра (континуума) с помощью широкополосного радиометрического канала (с некоторой потерей чувствительности) при существенном (в ~ 1.7 раза) повышении чувствительности в спектральных каналах к квазимонохроматическим сигналам радиолиний.

Для осуществления этого на практике в радиоспектрометрах РАТАН-600 [2, 3], работающих по методу двойного сравнения, были сделаны некоторые усовершенствования, позволившие расширить методические возможности аппаратуры и внедрить метод импульсной компенсации в наблюдения.

Настоящая статья в основном посвящена результатам экспериментальной проверки новых режимов работы. Под импульсно-компенсационным радиоспектрометром в нашем случае будет подразумеваться режим работы модернизированного радиоспектрометра двойного сравнения, обеспечивающий измерения по методу импульсной компенсации.

Функциональная схема. С целью осуществления работы по методу импульсной компенсации в функциональную схему радиоспектрометра двойного сравнения внесены следующие два основных изменения (рис. 1). Во-первых, на входе анализатора спектра установлен электрически управляемый аттенюатор (модулятор) *М*, с помощью которого осуществляется 100%-ная модуляция сигналов в каналах анализатора (при зам-

кнутаю ключе $K1$). Во-вторых, сделаны усовершенствования в схеме генератора $ГМИ$, позволившие изменять скважность прямоугольных модулирующих импульсов. Благодаря этому в случае работы по методу импульсной компенсации обеспечивается несимметричная модуляция, при которой антенна подключается ко входу приемника на большую часть ($\sim 80\%$) периода модуляции, а эквивалент — на меньшую ($\sim 20\%$).

Аттенуатор $М$, работая синхронно с переключателем $П$, запирает вход анализатора спектра на время подключения эквивалента. Вследствие этого сигналы на выходе спектральных каналов $СК1—СКN$ и на выходе канала сравнения имеют (после детектирования) вид последовательности импульсов со скважностью включения антенны.

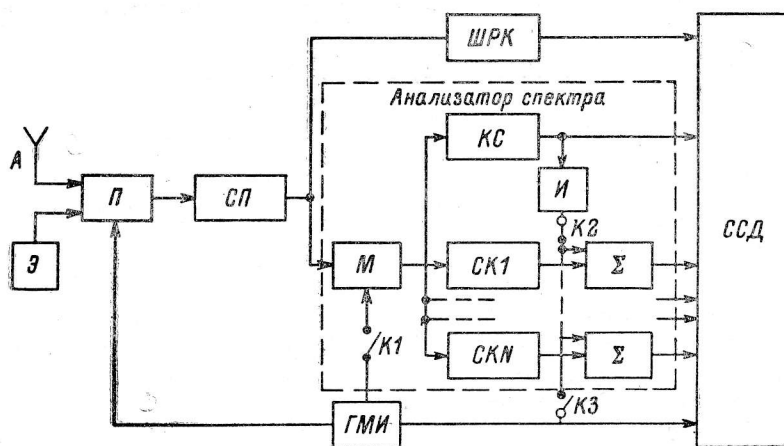


Рис. 1. Функциональная схема.

A — антенна; $Э$ — эквивалент; $П$ — переключатель; $СП$ — спектральный приемник; $ШРК$ — широкополосный радиометрический канал; $КС$ — канал сравнения; $М$ — модулятор; $K1, K2, K3$ — ключи; $ГМИ$ — генератор модулирующих импульсов; $СК1, СКN$ — спектральные каналы; $И$ — инвертор; $Σ$ — сумматор; $ССД$ — система сбора данных.

Сигналы с выходов спектральных каналов подаются на сумматоры $Σ$, где они при замкнутом ключе $K2$ ($K3$ разомкнут) компенсируются инвертированным (имеющим противоположную полярность) сигналом канала сравнения. Эта операция аналогична балансировке каналов в компенсационном радиоспектрометре [4] и служит для вычитания уровня континуума с помощью канала сравнения, отстроенного по частоте от исследуемой радиолнии и имеющего по сравнению со спектральными каналами значительно более широкую полосу пропускания.

Выходные сигналы анализатора и широкополосного радиометрического канала поступают в систему сбора данных $ССД$, где проводится их раздельное усиление, синхронное детектирование, интегрирование и регистрация по стандартной для модуляционных радиометров методике.

Выигрыш по чувствительности в спектральных каналах достигается за счет увеличения времени наблюдения сигнала от антенны (несимметричная модуляция) и полного подавления (аттенуатором $М$) шумов в каналах анализатора при подключенном эквиваленте. В работе [1] показано, что заметный выигрыш можно получить только в узкополосных спектральных каналах, в которых благодаря балансировке флуктуации выходных сигналов, вызванные нестабильностью характеристик аппаратуры, могут быть заметно меньше статистических флуктуаций, обусловленных шумовой температурой приемной системы.

При измерениях континуума с помощью широкополосного радиометрического канала метод импульсной компенсации неэффективен из-за преобладающего влияния флуктуаций коэффициента усиления

приемника. Поэтому здесь сохранен квазиулевого метод сравнения с эквивалентом при несимметричной модуляции, которая приводит к некоторому снижению (на $\sim 30\%$) теоретической чувствительности [1], но при этом благодаря квазиулевого методу эффективно ослабляется реакция радиометрического канала на нестабильность собственных шумов и коэффициента усиления приемника.

Программа исследований и параметры аппаратуры. Программа исследований включала в себя три основных этапа:

- 1) экспериментальную проверку обобщенной формулы теоретической чувствительности радиометра [1];
- 2) проведение серии наблюдений слабой радиолнии для сравнительной оценки эффективности метода импульсной компенсации;
- 3) выявление особенностей работы стандартных выходных устройств при несимметрично модулированных сигналах.

Для выполнения этой программы был использован радиоспектрометр на волну 21 см [3] со следующими параметрами:

- шумовая температура приемной системы с антенной $T_{m.a} \approx 180$ К;
- полоса пропускания широкополосного радиометрического канала $\Delta f_m \approx 8$ МГц;
- полоса пропускания спектрального канала $\Delta f_n = 30$ кГц;
- число спектральных каналов $N = 40$;
- полоса одновременного анализа $\Delta f_a = 1.2$ МГц;
- канал сравнения настроен на 2 МГц выше по частоте от центра полосы анализа и имеет полосу пропускания $\Delta f_c = 0.6$ МГц;
- частота модуляции $F_m = 25$ Гц;
- постоянная времени RC-фильтров нижних частот в выходных устройствах $\tau_1 = 1$ с и $\tau_2 = 6$ с.

Сбор данных с выходных устройств осуществляется с помощью электронного коммутатора и аналого-цифрового преобразователя с последующей передачей цифровой информации в виде десятиразрядных двоичных чисел в ЭВМ для регистрации на магнитной ленте. Цикл опроса каналов $t_{ци} = 0.5$ с при $\tau_1 = 1$ с и $t_{ци} = 3$ с при $\tau_2 = 6$ с; время опроса всех каналов 0.42 с.

Проверка формулы чувствительности. Полученную в [1] обобщенную формулу теоретической чувствительности радиометра можно представить в виде

$$\delta T = \mu T_{m.a} (\Delta f t)^{-1/2}, \quad (1)$$

где

$$\mu = \left(\frac{1}{\theta} + \frac{(1-M)^2}{(1-\theta)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

— коэффициент, определяющий методический проигрыш в чувствительности; Δf — полоса пропускания до квадратичного детектора; t — время интегрирования выходных сигналов; θ — коэффициент заполнения периода модуляции сигналом антенны ($0 < \theta < 1$); $M = 1 - \frac{T_{m.э} G_a}{T_{m.а} G_a}$ — коэффициент, характеризующий глубину модуляции напряжения на выходе квадратичного детектора, он может принимать значения от нуля (при нулевом методе) до единицы (при методе импульсной компенсации); $T_{m.э}$ — шумовая температура приемной системы с эквивалентом; G_a , $G_э$ — коэффициенты усиления мощности до детектора включительно, в общем случае изменяемые синхронно с частотой модуляции (G_a — когда подключена антенна, $G_э$ — когда эквивалент).

Задачу проверки формулы (1) можно свести к экспериментальной оценке зависимости (2):

$$\hat{\mu} = f(M, \theta). \quad (3)$$

Обозначим через $\delta\hat{T}(M, \theta)$ калиброванные в единицах антенной температуры среднеквадратичные значения выходных флуктуаций радиометра при заданных M и θ . Тогда (3) можно оценить по формуле

$$\hat{\mu}(M, \theta) = \mu(0, 0.5) \frac{\delta\hat{T}(M, \theta)}{\delta\hat{T}(0, 0.5)} = 2 \frac{\delta\hat{T}(M, \theta)}{\delta\hat{T}(0, 0.5)}, \quad (4)$$

где для режима нулевого радиометра с симметричной модуляцией ($M=0$; $\theta=0.5$) методический проигрыш в чувствительности принят равным теоретическому значению $\mu(0, 0.5)=2$.

С целью получения лучшего соответствия экспериментальных оценок теоретической формуле (2) были приняты специальные меры, чтобы исключить влияние нестабильности параметров аппаратуры на выходные флуктуации и уменьшить статистическую погрешность оценок (4). Измерения проводились одновременно в 40 спектральных каналах, сбалансированных с каналом сравнения (спектрометрический режим). В этом случае при указанных выше параметрах Δf_n и τ_1 в каналах заведомо выполнялось условие [1]

$$\frac{\delta T_{\text{ш. а}}}{T_{\text{ш. а}}} = (2\Delta f_n \tau_1)^{-1/2} \approx 4 \cdot 10^{-3} > \zeta_n,$$

где $\delta T_{\text{ш. а}}$ — предельная чувствительность; ζ_n — коэффициент, характеризующий аппаратную нестабильность.

Вклад шумов канала сравнения в выходные флуктуации спектральных каналов, определяемый коэффициентом $(1 + \Delta f_n / \Delta f_c)^{1/2}$ [1], составлял всего $\sim 2\%$. Для исключения внешних помех вход приемника на время каждой рабочей записи подключался к эквиваленту. При этом выполнялось условие $T_{\text{ш. а}} = T_{\text{ш. в}}$.

Экспериментальными оценками чувствительности $\delta\hat{T}(M, \theta)$ служили калиброванные и усредненные по всем спектральным каналам среднеквадратичные значения выходных флуктуаций в серии записей, сделанных для разных M и θ . Каждая рабочая запись длилась 120 с при $\tau_1=4$ с. Было также сделано несколько записей длительностью 1200 с при $\tau_2=6$ с.

Необходимая глубина модуляции M задавалась амплитудой модулирующих импульсов, подаваемых на аттенуатор M (рис. 1), а коэффициент заполнения θ — их скважностью. Оба эти параметра могли изменяться органами управления ГМИ.

Калибровка выходных сигналов проводилась до и после рабочей записи для каждой оценки $\delta\hat{T}(M, \theta)$ путем подачи в тракт антенны сигнала с известной шумовой температурой. На время калибровок вход приемника подключался к антенне, сигнал канала сравнения отключался от сумматоров (рис. 1) и вместо него для компенсации подавались модулирующие импульсы необходимой амплитуды от ГМИ (ключ $K2$ разомкнут, $K3$ замкнут). Вычисления $\delta\hat{T}(M, \theta)$ проводились на ЭВМ по стандартной программе [5].

На рис. 2 точками отмечены полученные из экспериментов значения $\hat{\mu}(M, \theta)$; отрезки вертикальных линий характеризуют удвоенную среднеквадратичную погрешность этих оценок; штрихом обозначены теоретические кривые, рассчитанные по формуле (2). Хорошее совпадение результатов эксперимента с теоретическими кривыми, по-видимому, можно считать достаточно убедительным подтверждением правильности формул (2) и (4).

На рис. 3 приведены копии записей калибровочных участков, полученных на самописце при методе импульсной компенсации ($M=1$; $\theta \approx 0.8$) и нулевом методе с симметричной модуляцией ($M=0$; $\theta=0.5$). В первом случае отношение сигнала к шуму примерно в 1.7 раза больше, чем во втором.

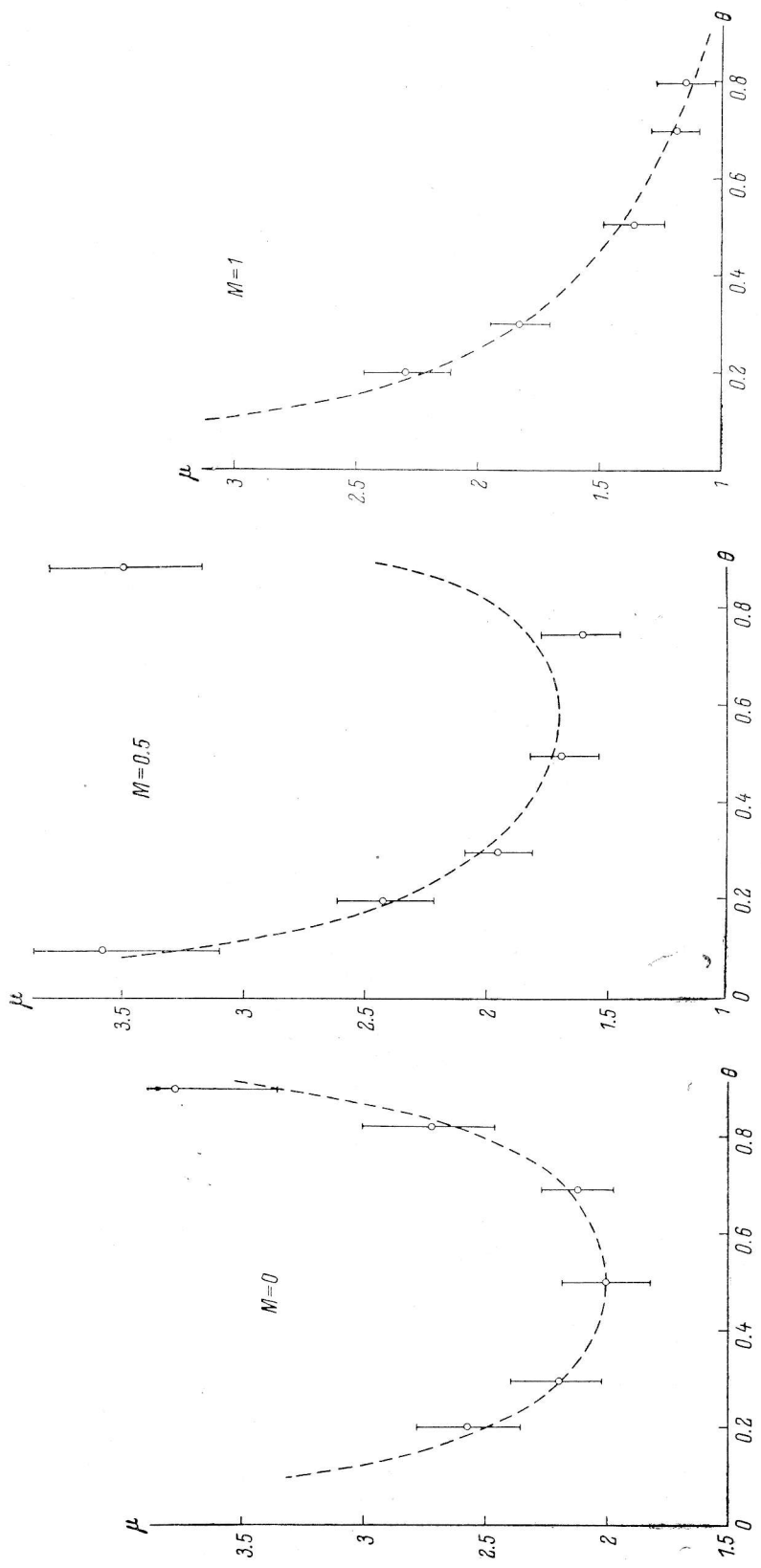


Рис. 2.

Наблюдения радиогалактики центавр А. Проверка эффективности метода импульсной компенсации в реальных условиях наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 была проведена в ходе исследования радиогалактики Центавр А на волне 21 см. Сигнал от линии нейтрального водорода, связанного с этим объектом, на одиночных записях обнаружить трудно, поэтому здесь особенно важно было использовать все доступные способы повышения чувствительности.

На рис. 4 представлены результаты наблюдений, выполненных на северном секторе РАТАН-600 во время прохождения радиогалактики Центавр А через неподвижную диаграмму антенны. Верхняя кривая получена путем усреднения десяти записей прохождения, сделанных на выходе широкополосного радиометрического канала. Ниже приведены кривые, полученные из записей сигналов в девяти спектральных кана-

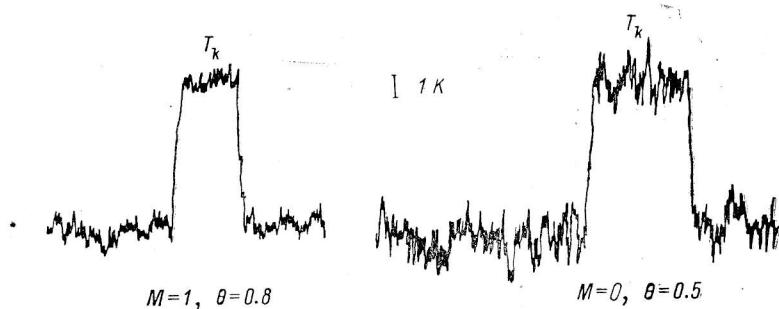


Рис. 3. Копии калибровочных участков (единичная запись).

$$\Delta f_{\text{н}} = 30 \text{ кГц}, \tau = 6 \text{ с}, T_{\text{м.а}} = 180 \text{ К.}$$

лах для двух серий наблюдений, одна из которых сделана по квазиулевому методу двойного сравнения ($M \approx 0$; $\theta = 0.5$), другая — по методу импульсной компенсации ($M = 1$; $\theta \approx 0.8$). Каждая из этих кривых является результатом усреднения пяти записей, сделанных при постоянной времени $\tau_2 = 6$ с.

Для удобства сравнения кривые построены в одном температурном масштабе и расположены попарно. Слева обозначены номера каналов, причем у кривых, полученных методом импульсной компенсации, эти номера обведены кружками. Справа указаны лучевые скорости атомов водорода, соответствующие настройке каналов.

Как видно из рис. 4, метод импульсной компенсации позволил заметно улучшить чувствительность радиоспектрометра. В среднем по всем спектральным каналам она возросла примерно в 1.7 раза.

Совместная обработка приведенных здесь наблюдательных данных с результатами дополнительных наблюдений позволила выявить неизвестные ранее особенности спектра линии водорода в радиогалактике Центавр А и получить новый астрофизический материал [6].

Особенности работы выходных устройств. Испытания радиоспектрометра в режиме импульсной компенсации проводились с двумя типами выходных устройств, построенных по схемам «двухполярный синхронный интегратор—однополярный синхронный детектор» [7] и «двухполярный синхронный детектор—фильтр нижних частот». В обоих случаях сигналы в выходные устройства подавались без постоянной составляющей (через разделительный конденсатор); полосы пропускания до интеграторов имели ширину не менее 1 кГц.

Разделительный конденсатор преобразует исходный однополярный сигнал модуляции в уравновешенные по площади разнополярные импульсы, амплитуды которых имеют противоположные зависимости от коэффициента заполнения θ . Вследствие этого параметры выходных

устройств зависят от θ , причем по-разному для различных способов синхронного детектирования.

Для схемы «двухполярный синхронный детектор—фильтр нижних частот» нормированный коэффициент передачи имеет вид (рис. 5)

$$K_1(\theta) = 4\theta(1 - \theta);$$

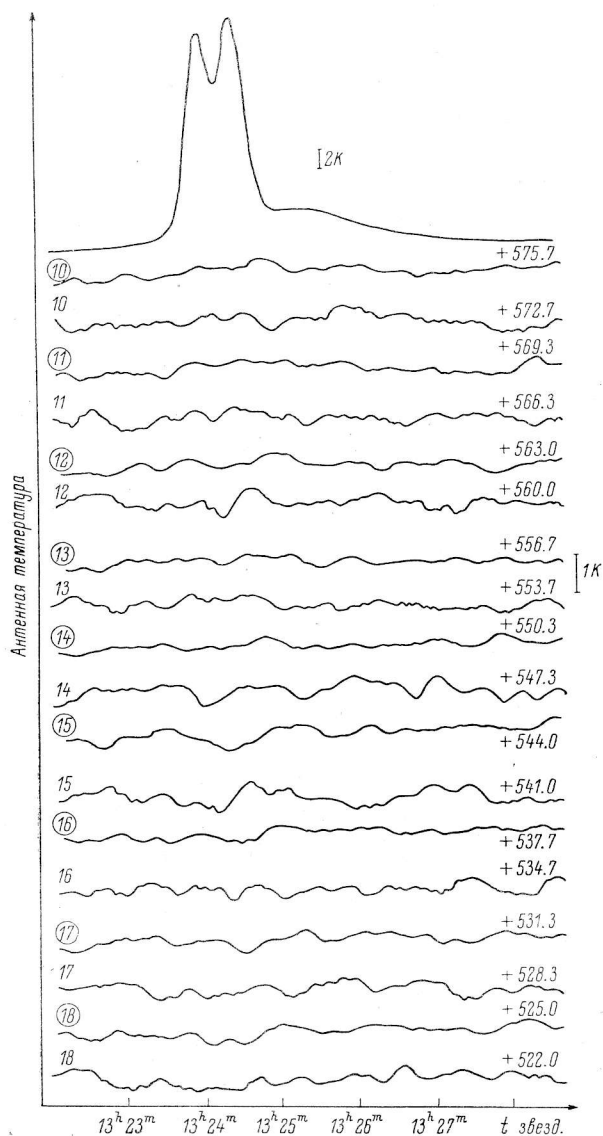


Рис. 4.

при этом постоянная времени выходного устройства не зависит от θ и определяется параметрами RC -фильтра нижних частот.

Для схемы «двухполярный синхронный интегратор—однополярный синхронный детектор» зависимость нормированного коэффициента передачи имеет вид

$$K_2(\theta) = 2(1 - \theta),$$

если детектируется часть периода модуляции, соответствующая подключенной антенне, или

$$K_3(\theta) = 2\theta,$$

если детектируется другая часть периода.

Отклик двухполярного синхронного интегратора на перепад амплитуды сигнала модуляции определяется выражением

$$h(t) = 1 - (1 - \theta) \exp\left(-\frac{\theta t}{\tau}\right) - \theta \exp\left[-\frac{(1 - \theta) t}{\tau}\right],$$

где τ — постоянная времени одного из равных плеч интегратора. Коммутация интегрирующих конденсаторов в этих плечах с помощью ключей,

синхронно управляемых модулирующими импульсами, приводит к зависимости эквивалентной постоянной времени τ_s выходного устройства от коэффициента заполнения θ . Величина $\tau_s(\theta)$ минимальна, когда $\theta = 0.5$ (симметричная модуляция). Изменение θ в любую сторону от $\theta = 0.5$ приводит к увеличению $\tau_s(\theta)$.

На рис. 6 приведена экспериментально снятая зависимость $\tau_s(\theta)/\tau_s(0.5)$

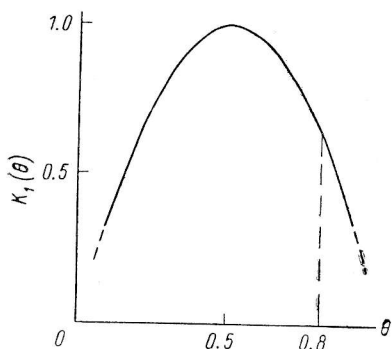


Рис. 5.

относительного изменения постоянной времени выходного устройства с синхронным интегратором [7]. Такие устройства применялись нами в наблюдениях радиогалактики Центавр А. Увеличение $\tau_s(\theta)$ при переходе от симметричной модуляции к несимметричной с коэффи-

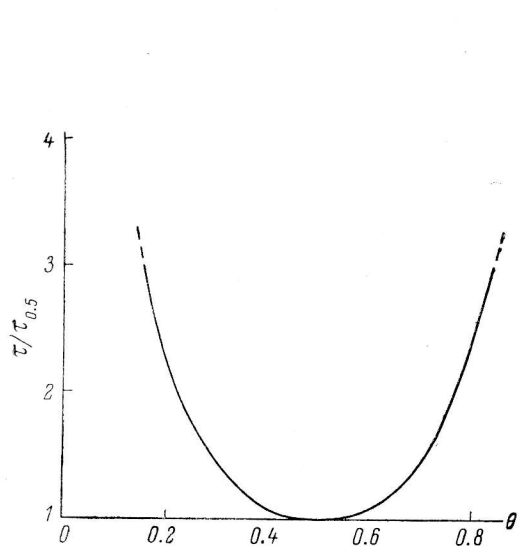


Рис. 6.

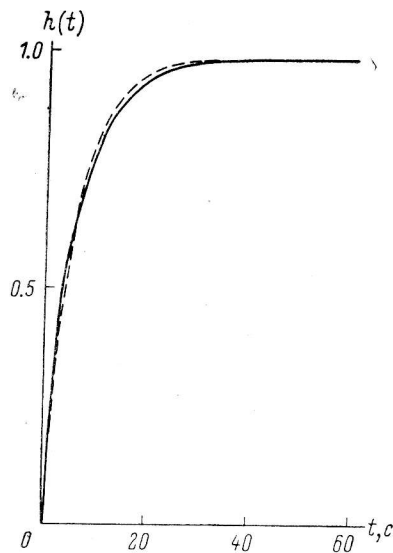


Рис. 7.

циентом заполнения $\theta \approx 0.8$ компенсировалось в этом случае соответствующим уменьшением исходной постоянной времени τ , определяемой параметрами RC -цепей в плечах синхронного интегратора. При этом форма переходной характеристики (сплошная кривая на рис. 7) несколько отличается от экспоненты (штриховая кривая), получающейся при симмет-

ричной модуляции, хотя постоянные времени, определенные по уровню 0.63, в обоих случаях одинаковы.

Заключение. Экспериментальные исследования, проведенные в одинаковых условиях на одной и той же аппаратуре, подтвердили реальность получения выигрыша в чувствительности радиоспектрометра при переходе от стандартного модуляционного метода измерений к методу импульсной компенсации. Внедрение последнего в штатных радиоспектрометрах РАТАН-600 потребовало незначительных материальных и трудовых затрат и совершенно не отразилось на программах управления аппаратурой и обработки наблюдений.

Эксперименты подтвердили также выводы работы [1] относительно области применения метода импульсной компенсации. При существующих сравнительно простых способах стабилизации характеристик приемных устройств может достигаться чувствительность, близкая к предельной при

$$\frac{\delta T_{\text{к}}}{T_{\text{ш. а}}} = (\Delta ft)^{-1/2} > 10^{-3},$$

т. е. в тех случаях, когда сама предельная чувствительность не очень высока. Следовательно, пока этот метод наиболее эффективно можно использовать в сравнительно узкополосных радиоспектрометрах. Более широкое его применение связано с проблемой стабилизации характеристик аппаратуры (или учета их нестабильности) и требует новых технических решений и экспериментальных исследований.

В заключение выражаем благодарность И. В. Госачинскому за помощь в подготовке программ экспериментов, проведении наблюдений и обработке результатов на ЭВМ и В. А. Прозорову за участие в экспериментах.

Поступила в редакцию
11.12.79

Список литературы

1. Грачев В. Г., Рыжков Н. Ф. Чувствительность радиометра и метод импульсной компенсации. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1980, 12, с. 68—76.
2. Госачинский И. В., Дравских А. Ф. и др. Радиоспектрографы для радиотелескопа РАТАН-600. — *Изв. ГАО*, 1972, 188, с. 168—171.
3. Венгер А. П., Грачев В. Г. и др. Комплекс программно-управляемых радиоспектрометров радиотелескопа РАТАН-600. — В кн.: XI Всесоюзная радиоастрономическая конференция по аппаратуре, антеннам и методам. Тезисы докладов. Ереван, 1978, с. 47—48.
4. Рыжков Н. Ф. Аппаратурные методы радиоспектроскопии межзвездной среды. II. Сравнительная оценка. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1976, 8, с. 89—119.
5. Алферова З. А., Госачинский И. В. Математическое обеспечение спектральных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1978, 10, с. 129—131.
6. Госачинский И. В., Грачев В. Г., Рыжков Н. Ф. Нейтральный водород в радиогалактике Центравр А. — В кн.: XII Всесоюзная конференция по галактической и внегалактической радиоастрономии. Тезисы докладов. М., 1979, с. 90.
7. Грачев В. Г., Прозоров В. А. Кварцевый фильтровый анализатор спектра. — *Изв. вузов, Радиофизика*, 1976, 19, № 11, с. 1741—1744.