

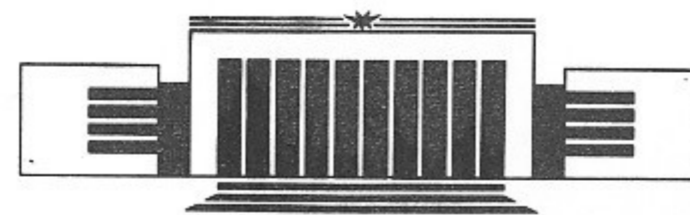


36
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

П.В. Воробьев, А.Н. Кирпотин,
М.Е. Ровкин, А.П. Болдырев

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ
КВАДРАТУРНЫЙ СВЧ ПРИЕМНИК
ДЛЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО
АКСИОННОГО ДЕТЕКТОРА

ИЯФ 94-57



НОВОСИБИРСК

Высокочувствительный квадратурный СВЧ приёмник для ферромагнитного аксионного детектора

П.В.Воробьев, А.Н.Курпотин

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,
Новосибирск,

Vorobyov@inp.nsk.su, Kurpotin@inp.nsk.su,

М.Е.Ровкин

Томская академия систем управления и радиоэлектроники,

А.П.Болдырев

Сахалинский радиофизический полигон, Южно-Сахалинск.

Приведено описание высокочувствительного квадратурного двухканального СВЧ приёмника для обеспечения когерентного накопления сигнала в эксперименте по поиску аксиона на ферромагнитном аксионном детекторе. Чувствительность приёмника достигает 10^{-20} Вт при времени накопления 1 – 10 секунд. Фурье-обработка сигнала обеспечивает панорамный обзор в полосе до ± 50 кГц при спектральном разрешении от 0.1 до 25 Гц. Приёмник может быть использован и в других прецизионных экспериментах, таких как исследование эффектов несохранения четности, измерение поляризации электронных и позитронных пучков в накопителях и в радиолокационных исследованиях атмосферы.

1 Введение

В литературе последних лет широко обсуждаются такие псевдоголдстоуновские бозоны, как арион, аксион, фамилон, майорон и целый ряд других [1]. Такие частицы и соответствующие им поля чрезвычайно слабо связаны с обычной материей. Если какие-либо из этих бозонов безмассовые или очень легкие, обмен такими бозонами должен приводить к появлению новых дальнедействующих сил. Имеется ряд астрофизических указаний на присутствие во Вселенной большого количества невидимой темной материи. Одним из естественных кандидатов на роль темной материи является псевдоголдстоуновский бозон — аксион. Как показано в работе [2] реликтовые аксионы могут образовать конденсат. Движение сквозь такой конденсат со скоростью \vec{v} фермион (электрон) будет воспринимать как эффективное магнитное поле, направленное вдоль вектора скорости фермиона относительно конденсата — "аксионный ветер":

$$\vec{B}_{eff} = \vec{b} \sin(m_a t + \theta), \quad \vec{b} = 2k\vec{v}\sqrt{\rho_a} \quad (1)$$

здесь m_a — масса аксиона, $k = \mu_a/\mu_b$ — безразмерная константа взаимодействия аксиона с электроном — отношение "аксионного магнетона" к магнетону Бора, ρ_a — плотность конденсата. Если масса аксиона строго равна нулю (арион), то возникает новое дальнедействующее поле, которое взаимодействует со спином фермиона как эффективное магнитное поле. Соответственно существует волновое уравнение для распространяющегося арионного поля a . Однако такая волна арионного поля содержит

только продольное эффективное магнитное поле:

$$\vec{B}_{eff} = -2\sqrt{\pi}\vec{\nabla}a \quad (2)$$

В этом смысле можно обсуждать "аксионную электродинамику", не забывая при этом, что арионное поле взаимодействует только со спином, а не с орбитальным моментом. В результате оно легко может быть отделено от магнитного поля с помощью системы сверхпроводящих магнитных экранов. Итак, мы видим, что детектирование аксиона связано с детектированием эффективного квазимагнитного поля аксионной волны.

Для эффективной регистрации аксионного конденсата выгодно использовать детектор на основе замагниченного (анти)ферромагнетика [3, 4, 5]. В этом случае конверсия аксион-фотон происходит не через треугольную диаграмму с заряженным фермионом в петле, а через процесс, аналогичный эффекту Комптона на электроде, связанном в атоме. Это сразу дает выигрыш в вероятности резонансной конверсии аксион-фотон в α^{-2} раз ($\alpha = 1/137$ — постоянная тонкой структуры).

Таким образом, как для поиска космологического аксионного конденсата, так и для реализации лабораторного ферромагнитного детектора, основанного на конверсии *магنون* → *аксион* → *магنون* [3], нам необходим высокочувствительный квадратурный приёмник, дающий возможность когерентного накопления сигнала.

2 Детектор с когерентным накоплением сигнала

Использование когерентной схемы с регистрацией квадратурных составляющих приводит к росту отношения сигнал/шум по сравнению с некогерентным накоплением в \sqrt{N} раз (N - число накоплений).

Дело в том, что при когерентном накоплении используется информация о фазе сигнала. Это позволяет суммировать амплитуды сигнала. При этом отклик детектора на когерентный сигнал пропорционален амплитуде E_s и числу накоплений N :

$$U_s = NE_s \quad (3)$$

а отклик на некоррелированную по фазе шумовую компоненту со среднеквадратичной амплитудой E_n пропорционален корню квадратному из N :

$$U_n = \sqrt{N}E_n \quad (4)$$

в результате для отношения сигнал/шум получим:

$$S/N = (U_s/U_n)^2 = N. \quad (5)$$

В то же время при некогерентном накоплении отклик детектора пропорционален мощности сигнала P_s и числу накоплений:

$$U_s^2 = NP_s. \quad (6)$$

Отклик детектора на шум также растет пропорционально числу накоплений, однако флуктуации энергии шума, на фоне которых нужно искать полезный сигнал растут пропорционально корню из числа накоплений:

$$U_n^2 = \sqrt{N}P_n \quad (7)$$

в результате отношение сигнал/шум при некогерентном накоплении

$$S/N = (U_s/U_n)^2 = \sqrt{N} \quad (8)$$

что в \sqrt{N} раз хуже, чем для когерентного случая.

Общая схема работы приёмника с когерентным накоплением сигнала следующая: имеется двухканальный квадратурный приёмник с общим для обеих каналов гетеродином. В качестве опорного генератора гетеродины используют атомный (цезиевый или рубидиевый) стандарт частоты (АСЧ), который обеспечивает фазовую привязку импульсов, с точностью не хуже, чем 0.01 рад. Сигнал, содержащий искомую информацию (сигнал ферромагнитного резонанса — ФМР в аксионном детекторе), подается на первый (высокочувствительный) вход квадратурного приёмника, гетеродинируется, разлагается на квадратурные составляющие и регистрируется двумя АЦП. Пилот-сигнал от генератора через направленный ответвитель и аттенюатор подается на вход второго канала приёмника, гетеродинируется и раскладывается на квадратурные составляющие. Видеоимпульсы соответствующих квадратурных компонент сигнала после прохождения согласованного фильтра оцифровываются двумя АЦП.

После завершения накопления сигнала в буферном ЗУ АЦП сигналы считываются в ЭВМ, где производится их обработка. Первичная обработка сигнала заключается в приведении сигнала приёмника к квадратурному базису пилот-сигнала. Такая процедура эквивалентна вычитанию в каждом периоде повторения случайной начальной фазы излученного радиоимпульса из фазы принятого сигнала. Получаемые при этом преобразованные квадратурные составляющие принятого сигнала

фактически соответствуют квадратурным составляющим сигнала при возбуждающем сигнале в виде периодической последовательности когерентных радиоимпульсов. Дальнейшая обработка сигнала заключается в фурье-анализе накопленной последовательности приведенных квадратур и выделении полезного сигнала.

Заметим, что при сдвиге последовательности квадратур приёмника относительно квадратур пилот-сигнала хотя бы на один импульс когерентность полностью теряется. Иными словами кросскорреляционная функция этих последовательностей практически является дельта-функцией:

$$C(k) = \sum_{n=1}^N A_t(n) \cdot A_r^*(n+k) = \delta(k) \quad (9)$$

Здесь $A_t(i)$ и $A_r(i)$ - комплексные амплитуды пилот-сигнала и сигнала приёмника, соответствующие i -му зондирующему импульсу. В этом смысле последовательность из N импульсов является фазо-манипулированным сигналом с длиной базы равной числу накоплений (от 256 до 4096 в нашем случае). Закон манипуляции фазой — случайный.

3 Схемы включения приёмника с когерентным накоплением сигнала для различных экспериментов

Сразу заметим, что везде ниже для удобства будем говорить об аксионе и аксионном поле, как о реально существующих объектах. Читатель должен помнить, что ни один псевдоголдстоуновский бозон (включая аксион) пока не найден и обсуждаемые ниже детекторы строятся именно для поиска таких частиц.

3.1 Лабораторный ферромагнитный детектор

Рассмотрим лабораторный детектор для поиска аксионов [3]. Принцип работы этого детектора состоит в следующем. Мощный СВЧ-генератор возбуждает резонансную прецессию спина электронов замагниченного (анти)ферромагнетика, заполняющего волновод-резонатор. Когерентная прецессия спинов возбуждает аксионную волну, которая распространяется вдоль оси волновода и свободно покидает его. Аксионная волна свободно проникает через систему электромагнитных экранов и попадает

в приёмный волновод, где и возбуждает резонансную прецессию спина в замагниченном феррите. Прецессирующий магнитный момент ферромагнетика порождает электромагнитную волну в приёмном волноводе-резонаторе, которая и регистрируется высокочувствительным когерентным приёмником. Таким образом в детекторе осуществляется двойная конверсия

$$\text{фотон} \rightarrow \text{магنون} \rightarrow \text{аксион} \rightarrow \text{магنون} \rightarrow \text{фотон}.$$

Блок-схема детектора приведена на рисунке 1.

Общая схема работы детектора следующая: детектор имеет двухканальный квадратурный приёмник с общим для обоих каналов гетеродином. В качестве опорного генератора гетеродина используют рубидиевый стандарт частоты (АСЧ). Сигнал от ферромагнитного резонанса, индуцированного аксионным полем в приёмном волноводе-резонаторе детектора, подается на первый (высокочувствительный) вход квадратурного приёмника, гетеродинируется, разлагается на квадратурные составляющие, фильтруется и регистрируется двумя АЦП (ADCt-C и ADCt-S). Сигнал генератора через направленный ответвитель и аттенюатор подается на вход второго канала приёмника (пилот-сигнал), гетеродинируется и раскладывается на квадратурные составляющие. Видеоимпульсы соответствующих квадратурных компонент пилот-сигнала после прохождения согласованного фильтра оцифровываются двумя АЦП (ADCt-C и ADCt-S). Все АЦП имеют буферные ЗУ емкостью по 4К слов. Синхронизация работы детектора обеспечивается генератором временных интервалов - ГВИ, который управляется от ЭВМ. После завершения накопления сигнала в буферном ЗУ АЦП сигналы считываются в ЭВМ, где производится их обработка: приведение сигнала приёмника к квадратурному базису передатчика и фурье-анализ.

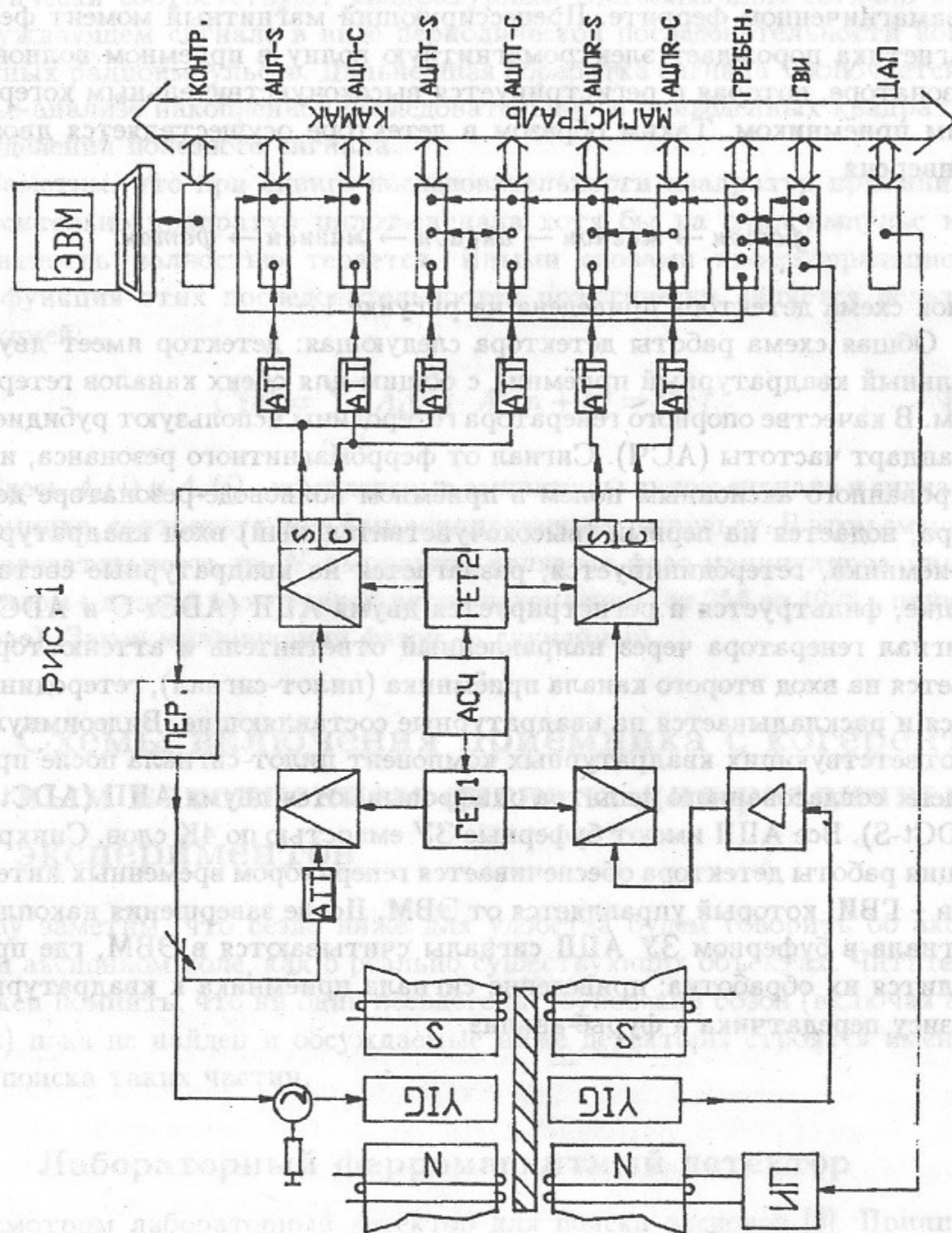


РИС. 1

3.2 Детектор космологического аксионного конденсата ГАЛОСКОП

Рассмотрим детектор космологического аксионного конденсата ГАЛОСКОП [2]. Он состоит из СВЧ резонатора, работающего на моде TE_{011} . В центре резонатора в пучности магнитного поля помещен небольшой сферический образец из (анти)ферромагнетика с высокой добротностью ферромагнитного резонанса. Резонатор помещен в постоянное внешнее магнитное поле таким образом, что намагниченность ферромагнитной сферы перпендикулярна направлению магнитной составляющей СВЧ поля резонатора. Величина подмагничивающего поля выбрана такой, что частота ферромагнитного резонанса соответствует собственной частоте резонатора на TE_{011} моде. Пусть детектор движется через аксионный конденсат так, что вектор эффективного квазимагнитного поля \vec{b} перпендикулярен подмагничивающему полю. Если частота осцилляций поля \vec{b} совпадает с частотой ферромагнитного резонанса, это приведет к прецессии вектора намагниченности ферромагнитного образца [2]. Появляется осциллирующая компонента магнитного момента образца, хорошо связанная с магнитным полем TE_{011} колебания резонатора. Такая связь обеспечивает перекачку мощности из квазимагнитной волны в электромагнитное поле резонатора (и наоборот), которое может быть зарегистрировано высокочувствительным приёмником. Оценим чувствительность аксионного ферромагнитного детектора. Равновесная амплитуда осциллирующей поперечной намагниченности, индуцированная квазимагнитным полем \vec{b} , определяется выражением:

$$m_{\perp} = m_0 \left(\frac{b}{B_0} \right) Q_f \quad (10)$$

где: b — амплитуда квазимагнитного поля, B_0 — внешнее подмагничивающее поле, Q_f — ферромагнитная добротность образца, m_0 — намагниченность насыщения образца. Для протяженного волновода-резонатора длиной L , заполненного ферритом, мощность, излучаемая системой с осциллирующим магнитным моментом m , определяется выражением:

$$P = \frac{\omega^4}{3c^3} m_0^2 \left(\frac{b}{B_0} \right)^2 Q_f (kL)^2 \quad (11)$$

здесь $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Задание предельной чувствительности приёмника P_N позволяет оценить чувствительность детектора:

$$b = \left(\frac{3c^3 P_N}{\omega^4 Q_f} \right)^{1/2} \frac{1}{kL} \frac{B_0}{m_0} \quad (12)$$

Пусть чувствительность $P_N = 10^{-22}$ Вт = 10^{-15} эрг/сек, $\omega = 10^{11}$ Гц, $m_0 = 10^3$ гс, $B_0 = 3 \cdot 10^3$ гс, $Q_f = 10^3$, $(kL)^2 = 10^3$. Подставляя эти величины, получим $b = 10^{-15}$ гс. При локальной плотности конденсата в гало $\rho_a = 10^{-25}$ г/см³ это позволяет получить ограничение на константу связи аксион-электрон на уровне $q_{ae} < 10^{-6}$ ГэВ⁻¹. В работе [5] показано, что использование антиферромагнетика типа $FeVO_3$ с большим внутренним полем Дзялошинского дает увеличение чувствительности в 10^3 раз при температуре 4 К. Достижимая чувствительность для детекторов этого типа достигает: $b < 10^{-18}$ гс, $q_{ae} < 10^{-9}$ ГэВ⁻¹.

Возможны две схемы включения приёмника:

- 1) Сигнал ферромагнитного резонанса принимается высокочувствительным входом и разлагается на квадратурные компоненты относительно базиса, заданного высокостабильным гетеродином. В этом случае низкочувствительный опорный канал не используется.
- 2) Используется опорный канал, на который подается пилот-сигнал от высокостабильного генератора (синтезатор частоты с АСЧ). Такая схема представляется более выгодной по следующим соображениям:
 - При работе в широком диапазоне частот возможно использование СВЧ-головок стандартных СВЧ приёмников типа ПК7-8, ПК7-11 и ряда других, которые содержат СВЧ-усилитель, смеситель, гетеродин и УПЧ. Низкая стабильность собственного первого гетеродина приёмника в данной схеме роли не играет, так как когерентность задается высокостабильным пилот-сигналом. Такой пилот-сигнал легко получается умножением частоты синтезатора Ч6-71, который в качестве опорного генератора использует АСЧ.
 - От пилот-сигнала, в отличие от сигнала гетеродина, не требуется одновременно с чрезвычайно высокой стабильностью еще и достаточно высокая мощность.
 - Пилот-сигнал может использоваться для подстройки ФМР и калибровки детектора между циклами измерения (рис. 2).

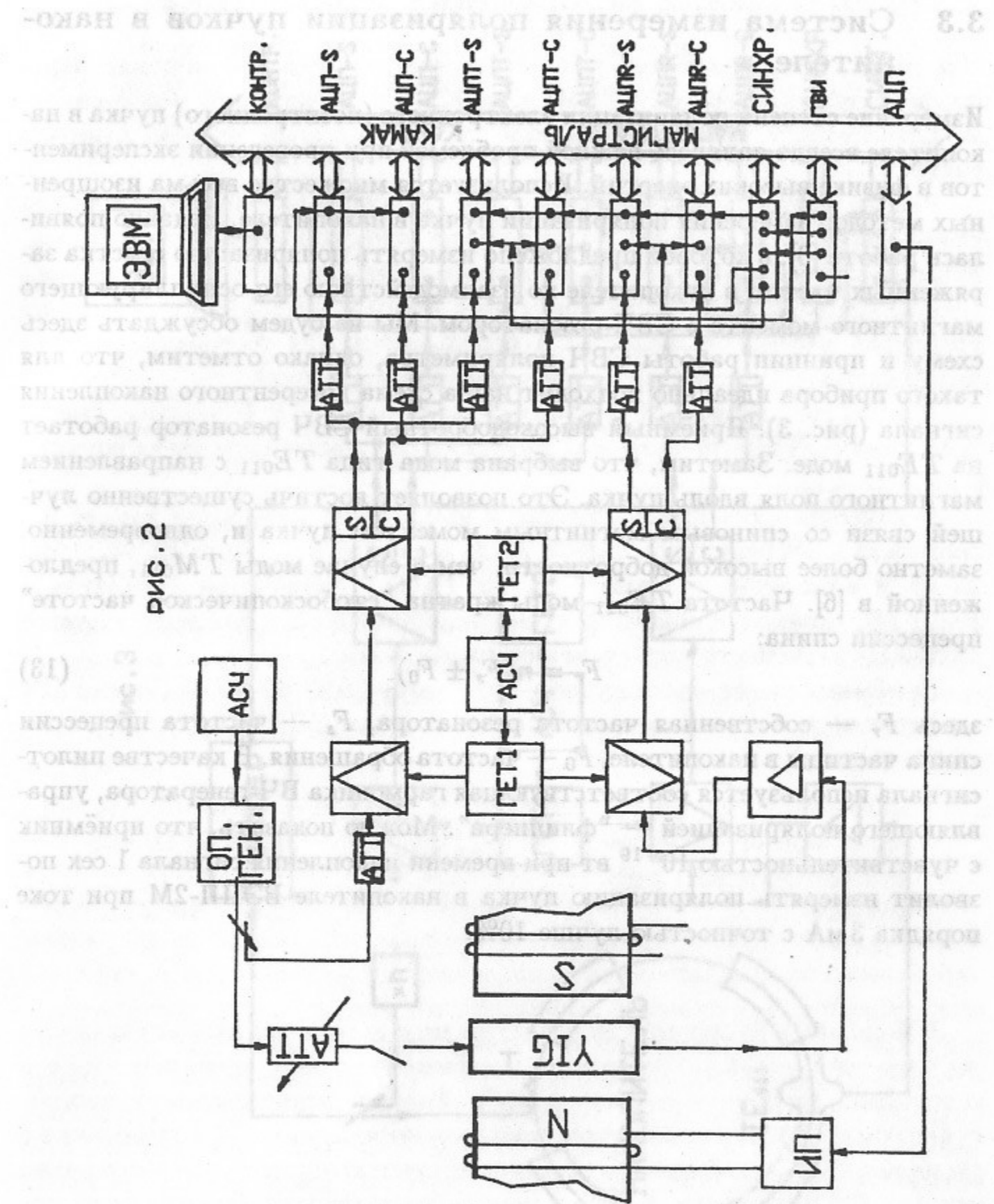


РИС. 2

3.3 Система измерения поляризации пучков в накопителе

Измерение степени поляризации электронного (позитронного) пучка в накопителе всегда являлось важной проблемой при проведении экспериментов в физике высоких энергий. Используется множество весьма изощренных методов измерения поляризации пучка в накопителе. Недавно появилась работа [6], в которой предложено измерять поляризацию сгустка заряженных частиц в накопителе по взаимодействию его осциллирующего магнитного момента с СВЧ резонатором. Мы не будем обсуждать здесь схему и принцип работы СВЧ поляриметра, однако отметим, что для такого прибора идеально подходит наша схема когерентного накопления сигнала (рис. 3). Приёмный высокочастотный СВЧ резонатор работает на TE_{011} моде. Заметим, что выбрана мода типа TE_{011} с направлением магнитного поля вдоль пучка. Это позволяет достичь существенно лучшей связи со спиновым магнитным моментом пучка и, одновременно, заметно более высокой добротности, чем в случае моды TM_{011} , предложенной в [6]. Частота TE_{011} моды кратна "стобоскопической частоте" прецессии спина:

$$F_r = n(F_s \pm F_0) \quad (13)$$

здесь F_r — собственная частота резонатора, F_s — частота прецессии спина частицы в накопителе, F_0 — частота обращения. В качестве пилот-сигнала используется соответствующая гармоника ВЧ-генератора, управляющего поляризацией — "флиппера". Можно показать, что приёмник с чувствительностью 10^{-19} Вт при времени накопления сигнала 1 сек позволит измерять поляризацию пучка в накопителе ВЭПП-2М при токе порядка 3 мА с точностью лучше 10%.

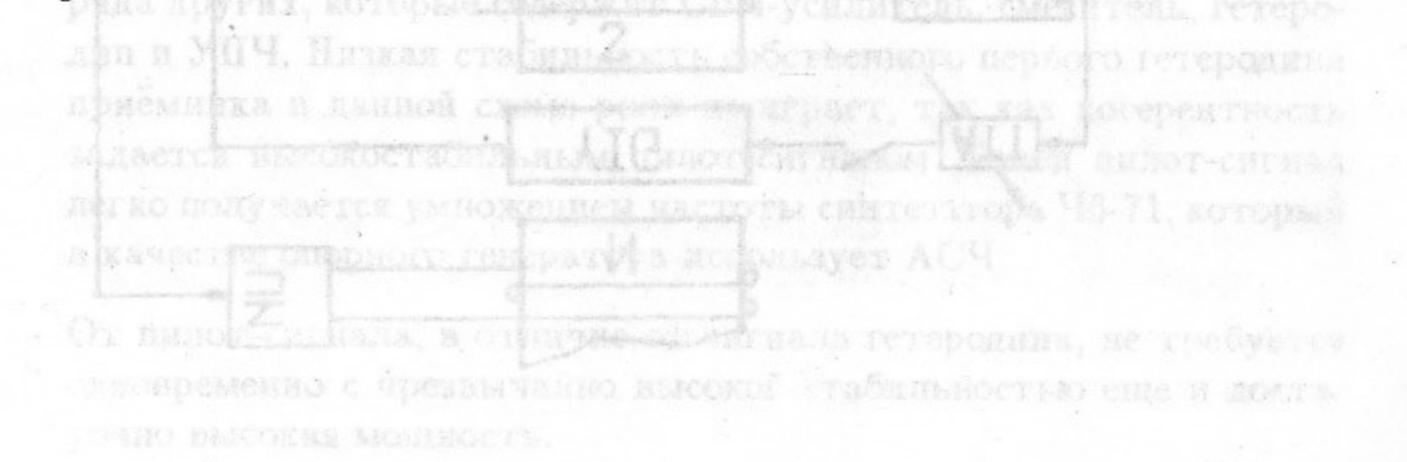


Рис. 3. Система измерения поляризации пучков в накопителе.

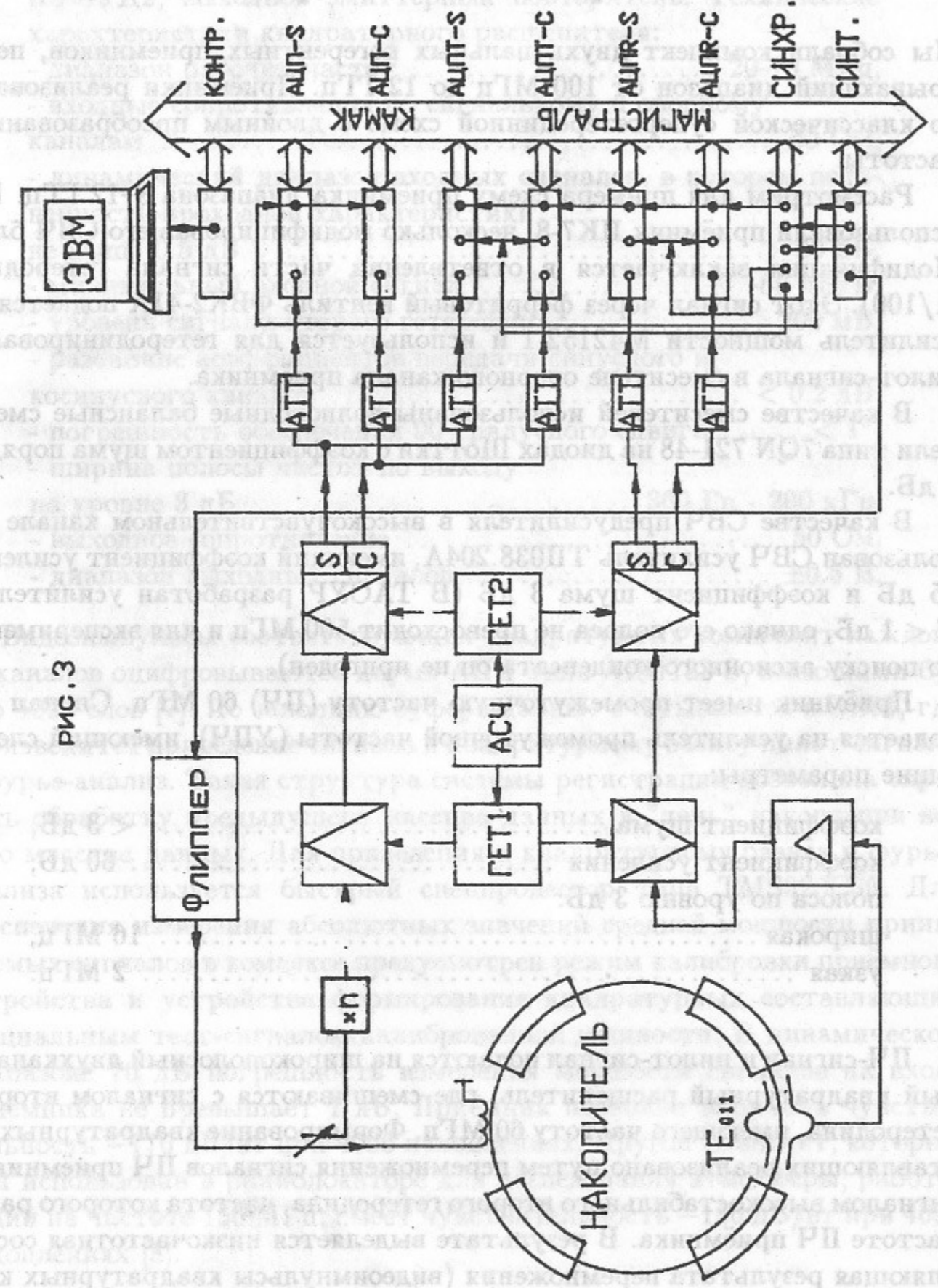


РИС. 3

Каналы квадратурного детектирования и корреляции. Ключом соединяющий амплитудный повторитель, ведомый тем же микропроцессором K174001, усилитель низкой частоты.

4 Аппаратная реализация приёмника

Мы собрали комплект двухканальных когерентных приёмников, перекрывающий диапазон от 100 МГц до 12 ГГц. Приёмники реализованы по классической супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты.

Рассмотрим для примера схему приёмника диапазона 8–12 ГГц. Мы использовали приёмник ПК7-8, несколько модифицировав его СВЧ блок. Модификация заключается в ответвлении части сигнала гетеродина (1/100). Этот сигнал через ферритовый вентиль ФВК2-41А подается на усилитель мощности М42152-1 и используется для гетеродинирования пилот-сигнала в смесителе опорного канала приёмника.

В качестве смесителей использованы волноводные балансные смесители типа 7QN 721-48 на диодах Шоттки с коэффициентом шума порядка 5 дБ.

В качестве СВЧ предусилителя в высокочувствительном канале использован СВЧ усилитель ТП038.204А, имеющий коэффициент усиления 25 дБ и коэффициент шума 3 дБ (в ТАСУР разработан усилитель с $F < 1$ дБ, однако его полоса не превосходит 500 МГц и для эксперимента по поиску аксионного конденсата он не пригоден).

Приёмник имеет промежуточную частоту (ПЧ) 60 МГц. Сигнал ПЧ подается на усилитель промежуточной частоты (УПЧ), имеющий следующие параметры:

коэффициент шума	< 3 дБ,
коэффициент усиления	60 дБ,
полоса по уровню 3 дБ:	
широкая	16 МГц,
узкая	2 МГц.

ПЧ-сигнал и пилот-сигнал подаются на широкополосный двухканальный квадратурный расщепитель, где смешиваются с сигналом второго гетеродина, имеющего частоту 60 МГц. Формирование квадратурных составляющих реализовано путем перемножения сигналов ПЧ приёмника с сигналом высокостабильного второго гетеродина, частота которого равна частоте ПЧ приёмника. В результате выделяется низкочастотная составляющая результата перемножения (видеоимпульсы квадратурных компонент). Каналы квадратурного расщепителя идентичны и содержат:

входной согласующий эмиттерный повторитель, перемножитель на микросхеме К174ПС1, усилитель низкой частоты

К544УД2, выходной эмиттерный повторитель. Технические характеристики квадратурного расщепителя:

- диапазон рабочих частот	20-70 МГц,
- входные сопротивления по сигнальному и опорному каналам	50 Ом,
- динамический диапазон входных сигналов, в котором нелинейность проходной характеристики не выше 0.5 дБ	60 дБ,
- минимальный входной сигнал	-86 дБ/В,
- уровень сигнала второго гетеродина	200 мВ,
- разбаланс коэффициентов передачи синусного и косинусного каналов	< 0.2 дБ,
- погрешность обеспечения 90-градусного сдвига	< 1°,
- ширина полосы частот по выходу на уровне 3 дБ	300 Гц - 200 кГц,
- выходное сопротивление	50 Ом,
- диапазон выходных сигналов	± 0.5 В.

Видеоимпульсы соответствующих квадратурных компонент каждого из каналов оцифровываются двумя АЦП типа АЦП122-S, имеющими буфер 4096 слов [7]. По заполнению буфера данные считываются в ЭВМ, где производится приведение сигнала к квадратурному базису пилот-сигнала и фурье-анализ. Такая структура системы регистрации позволила спрятать обработку предыдущего массива данных в "тень" накопления нового массива данных. Для приведения к квадратурному базису и фурье-анализа используется быстрый спецпроцессор типа TMS320C30. Для обеспечения измерения абсолютных значений средней мощности принимаемых сигналов в комплексе предусмотрен режим калибровки приёмного устройства и устройства формирования квадратурных составляющих специальным тест-сигналом калиброванной мощности. В динамическом диапазоне 70 дБ погрешность измерения мощности сигналов на входе приёмника не превышает 1 дБ. Приёмник позволил получить чувствительность -170 дБ/Вт при 4096 накоплениях. Другой комплект, который был использован в радиолокаторе для исследования атмосферы, работающий на частоте 150 МГц, имеет чувствительность -180 дБ/Вт при 4096 накоплениях [8].

5 Калибровка приёмного комплекса детектора и контрольные измерения

Была проведена серия измерений для калибровки чувствительности различных элементов квазикогерентного комплекса детектора.

1. Измерены собственные шумы аналого-цифровой части макета, которая обеспечивает измерение квадратурных компонент пилот-сигнала и сигнала приёмника ФМР, приведение сигнала приёмника к квадратурному базису пилот-сигнала и когерентное накопление сигнала с последующим фурье-анализом.

Измерения проводились по следующей методике. На входы квадратурных расщепителей вместо сигнала ПЧ передатчика и приёмника подавался сигнал от стабильного внешнего генератора, частота которого соответствовала частоте сигналов ПЧ приёмника. Была измерена дисперсия амплитуды и фазы сигнала "приёмника", накопленного после приведения к квадратурному базису сигнала "передатчика" (напомним, что это один и тот же сигнал, измеряемый с регулируемой задержкой по времени). Типичное число накоплений - 4096. В результате измерений получено:

- СКО фазы - $DF < 1^\circ$;
- СКО амплитуды - $DA < 0.01$ (в отн. единицах).

В существенной степени эти параметры определяются нестабильностью параметров сигнала калибровочного генератора.

2. Измерена ортогональность базиса квадратурных расщепителей. Неортогональность не превосходит одного градуса. Вообще говоря, этот параметр не является существенным для работы системы, так как неортогональность базиса квадратурных расщепителей измеряется при калибровке системы и учитывается при первичной обработке.

3. Измерена чувствительность приёмно-регистрирующей системы детектора с использованием внешнего калибровочного генератора.

- чувствительность приёмника без когерентного накопления сигнала при отношении сигнал/шум = 2 — $P = -142$ дБ/вт;
- чувствительность приёмника при когерентном накоплении сигнала по 4096 импульсам — $P = -178$ дБ/вт.

Видно, что выигрыш в чувствительности при когерентном накоплении в точности соответствует числу накоплений. В тоже время измерения показывают, что ширина пика на нулевой частоте в спектре мощности сигнала равна обратному времени накопления. Эти факты свидетельствуют об отсутствии потерь когерентности в системе и позволяют говорить о реализации истинно когерентного режима работы детектора.

6 Заключение

Построен приёмный комплекс с когерентным накоплением сигнала, имеющий чувствительность порядка -190 дБ/вт при времени накопления сигнала 1 секунда. Фурье-обработка сигнала обеспечивает панорамный обзор в полосе до ± 50 кГц при спектральном разрешении от 0.1 до 25 Гц. Приёмник может быть использован в прецизионных экспериментах таких, как поиск аксионной "темной материи", исследование эффектов несохранения четности, измерение поляризации электронных и позитронных пучков в накопителях, в радиолокационных исследованиях атмосферы и т.д.

Мы благодарны А.М.Батракову, М.Э.Круглякову, О.В.Пирогову и В.Ф.Фогелю за помощь и многочисленные обсуждения.

Отвественный за выпуск С.Г. Павлов
Работа поступила 15 июня 1994 г.

Сдано в набор 22 августа 1994 г.

Подписано в печать 22 августа 1994 г.

Формат бумаги 60x90 1/16 Объем 1.1 печ.л., 0.9 уч.-ил. л.

Тираж 720 экз. Бесплатно. Заказ № 57

Обработано на ИИМ РС и отпечатано на

роталпринте ИИФ им. Г.И. Будкера СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.

Список литературы

- [1] А.А. Ансельм, Н.Г. Уральцев. Физика элементарных частиц. Материалы XX зимней школы ЛИЯФ, Л., 1985.
- [2] П.В. Воробьев, А.И. Кахидзе, И.В. Колоколов. Препринт ИЯФ 94-38, Новосибирск. (будет опубликовано в журнале Ядерная Физика апрель 1995)
- [3] P. V. Vorobyev, I. V. Kolokolov and V. F. Fogel. Particle World, 1 (1990) 163.
П.В. Воробьев, И.В. Колоколов, В.Ф. Фогель. Физика высоких энергий. Материалы XXV зимней школы ЛИЯФ, Ленинград, 1990.
- [4] R. Barbieri et al. Phys. Lett., B226 (1989) 357.
- [5] А.И. Кахидзе, И.В. Колоколов. ЖЭТФ 99 (1991) 1077.
- [6] Ya. S. Derbenev. NIM A336 (1993) 12.
- [7] А.М. Батраков, В.Р. Козак, М.Э. Кругляков. Препринт ИЯФ 88-98, Новосибирск 1988.
- [8] П.В. Воробьев, А.Н. Кирпотин и др. Препринт ИЯФ 94-58, Новосибирск 1994.

П.В. Воробьев, А.Н. Кирпотин, М.Е. Ровкин, А.П. Болдырев

**Высокочувствительный квадратурный СВЧ приемник
для ферромагнитного аксионного детектора**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов
Работа поступила 15 июня 1994 г.

Сдано в набор 22 августа 1994 г.
Подписано в печать 22 августа 1994 г.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.1 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 220 экз. Бесплатно. Заказ № 57

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротопринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.