



ISSN 1607–2855

Том 4 · № 2 · 2003 С. 33–37

УДК 520

## Измерение интенсивности переменных радиоисточников с помощью адаптивного четырехуровневого АЦП

И.О. Литвиненко

Обсерватория УРАН-4 Радиоастрономического института НАН Украины, Одесса

*Показано, что на базе 4-уровневых АЦП можно создать корреляционный радиометр с большим динамическим диапазоном, предназначенный для исследования переменных космических радиоисточников, включая солнечные радиовсплески. Определены рабочие характеристики 4-х уровневых АЦП с адаптивным порогом квантования и предложена методика измерения мощности и корреляции принимаемых сигналов.*

*ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗМІННИХ РАДІОДЖЕРЕЛ ЗА ДОПОМОГОЮ АДАПТИВНОГО ЧОТИРЬОХРІВНЕВОГО АЦП, Литвиненко І.О. — Показано, що на базі чотирьохрівневих АЦП можна створити кореляційний радіометр із великим динамічним діапазоном, призначений для дослідження змінних космічних радіоджерел, включаючи сонячні радіовсплески. Визначено робочі характеристики чотирьохрівневих АЦП з адаптивним порогом квантування і запропонована методика виміру потужності і кореляції прийнятих сигналів.*

*MEASURING OF INTENSITY OF VARIABLE RADIO SOURCES USING THE 4-LEVEL ADAPTIVE DIGITIZER, by Litvinenko I.O. — Possibility of creation of the correlation radiometer with the wide dynamic range on the basis of 4-level digitizer intended for research of variable space radio sources, including solar radiobursts is shown. Working characteristics of the 4-level digitizer with an adaptive quantization are determined and the technique of power and correlation measurements of accepted signals is offered.*

Одной из особенностей радиоастрономических наблюдений в декаметровом диапазоне волн [1] является высокая радиояркость галактического фона. Мощность фона на входе радиоприемного устройства, часто превышает мощность наблюдаемых галактических и внегалактических компактных радиоисточников. Задача измерения потока источника при наличии мощного галактического фона решается с помощью двухканальных радиометров. Каждый из каналов радиометра подключен к отдельной антенне. Антенны разнесены в пространстве. Сигналы с выходов антенн усиливаются приемными устройствами, перемножаются и интегрируются. Это обеспечивает подавление составляющей сигнала, относящейся к галактическому фону. По способу обработки сигналов, поступающих от приемников, радиометры можно разделить на аналоговые (перемножение и интегрирование сигналов в аналоговом виде), аналого-цифровые (аналоговое перемножение и цифровое интегрирование), цифровые (цифровое перемножение и интегрирование).

Первые два типа радиометров имеют небольшой динамический диапазон. Поэтому, на входе радиометра располагают калиброванные аттенюаторы, затухание которых устанавливают в соответствии с предполагаемой интенсивностью каждого исследуемого источника. Задача расширения динамического диапазона решается в цифровых радиометрах. В этом случае требуется АЦП, с количеством разрядов, обеспечивающим необходимый динамический диапазон, и необходимое быстродействие, соответствующее ширине полосы пропускания приемной аппаратуры.

В качестве примера, рассмотрим ситуацию применительно к радиотелескопу УРАН-4 [2]. Будем считать, что уровень шумов при наблюдении слабых источников соответствует потоку 50 Ян. Это нижняя граница динамического диапазона. В случае наблюдения компактных радиоисточников, верхнюю границу определим по самому интенсивному компактному радиоисточнику 3С461, учитывая галактический фон и эффект мерцаний источника. Верхнюю границу примем равной

$2 \cdot 10^5$  Ян. Таким образом, динамический диапазон составляет 36 дБ. Этому динамическому диапазону соответствует 11-разрядный АЦП. В случае включения солнечных и ионосферных радиовсплесков в объекты исследования, динамический диапазон должен быть расширен на 17 дБ, что соответствует увеличению разрядности АЦП до 17. Это обеспечит возможность наблюдения всплесков с потоком до  $10^7$  Ян. При частоте отсчетов 50 кГц, поток данных, поступающих с АЦП, составит 1.7 Мб/с на один приемный канал.

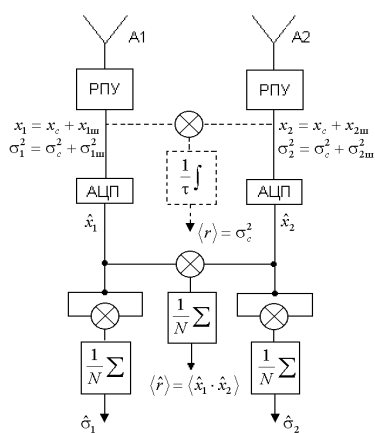
Используемые ЭВМ должны обеспечить обработку потока цифровой информации в реальном времени или накопление необходимого объема данных (если ведется независимая запись данных, как, например, в радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами [3,4]). Увеличение количества поляризационных и частотных каналов, расширение полосы частот радиоприемников, так или иначе, приводит к несоответствию между потоком данных и ресурсами имеющейся цифровой техники.

Описанные выше требования к разрядности и частоте отсчетов АЦП, позволяющие полностью отображать огибающую принимаемого радиосигнала, в случае измерения средней мощности шумоподобных сигналов являются избыточными. В связи с этим, в радиоинтерферометрах с независимой записью сигналов для измерения мощности и ковариации шумоподобных сигналов широкое применение получил 4-х уровневый АЦП, один отсчет которого занимает два двоичных разряда [4]. Но применение такого АЦП имеет существенное ограничение — он должен быть предварительно настроен на мощность принимаемого сигнала и она, в течение наблюдений, не должна существенно меняться. Такая методика наблюдений мало подходит для быстропеременных сигналов, таких, например, как солнечные или ионосферные всплески.

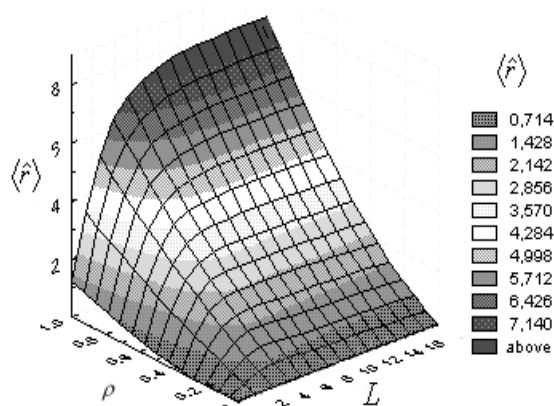
Выходом из этой ситуации может быть использование 4-х уровневого АЦП с адаптивным порогом квантования. Ниже рассматриваются вопросы, связанные с возможностью построения на базе такого АЦП радиометра с большим динамическим диапазоном, пригодного для исследования как радиовсплесков, так и сильно отличающихся по потоку компактных космических радиоисточников.

На рис.1 изображена схема двухканального радиометра. Пунктиром изображен аналоговый вариант радиометра.

Будем считать, что сигналы на выходе радиоприемных устройств (РПУ)  $x_1 = x_c + x_{1ш}$  и  $x_2 = x_c + x_{2ш}$ , представляют собой гауссовский шум, состоящий из измеряемого сигнала  $x_c$  и не-



**Рис. 1.** Структурная схема двухканального радиометра



**Рис. 2.** Зависимость сигнала  $\langle \hat{r} \rangle$  на выходе коррелятора с 4-х уровневым АЦП от коэффициента корреляции входных сигналов  $\rho$  и параметра  $L$ , равного отношению среднеквадратического отклонения сигнала на входе АЦП к величине порога квантования

коррелированных шумов,  $\langle x_{1ш} \cdot x_{2ш} \rangle = 0$ . Мощность этих сигналов и  $\sigma_1^2 = \sigma_c^2 + \sigma_{1ш}^2$  и  $\sigma_2^2 = \sigma_c^2 + \sigma_{2ш}^2$  ( $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение). На выходе аналогового коррелятора получим сигнал  $\langle r \rangle = \langle x_1 \cdot x_2 \rangle = \sigma_c^2$ , пропорциональный средней за интервал интегрирования мощности измеряемого сигнала. Коэффициент корреляции входных сигналов  $\rho = \sigma_c^2 / \sigma_1 \cdot \sigma_2$ .

Рассмотрим работу цифрового радиометра с 4-х уровневыми АЦП. Для простоты будем считать, что коэффициенты усиления приемников одинаковы (это, например, полностью соответствует модуляционной схеме реализации радиометра) и равны мощности сигналов на входах РПУ (это реализуется при относительно небольшом расстоянии между антеннами, что имеет место в реальных радиометрах). Из этих допущений следует, что  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ .

4-х уровневый АЦП имеет три порога квантования  $-v, 0, +v$ . Квантованным состояниям присваиваются значения  $-n, -1, +1, n$  (таким образом формируется четырехуровневый сигнал  $\hat{x}$ , который кодируется двумя битами).

Сигнал на выходе цифрового коррелятора, представляющий собой ковариацию выходных сигналов АЦП  $\langle \hat{r} \rangle = \langle \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_2 \rangle$ , является функцией двух переменных  $\langle \hat{r} \rangle = F(\rho, L)$ :  $\rho$  — коэффициента корреляции сигналов, поступающих на вход коррелятора, и  $L = \sigma/v$  — отношения среднеквадратического отклонения сигналов на входе АЦП к величине порога квантования. Воспользуемся выражением этой функции, приведенным в [4], и представим ее в следующем виде:

$$\langle \hat{r} \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\rho \frac{L^2}{\sqrt{AB}} \left\{ (n-1)^2 \left[ \exp\left(-\frac{1}{A}\right) + \exp\left(-\frac{1}{B}\right) \right] + 4(n-1) \exp\left(-\frac{L^2}{2AB}\right) + 2 \right\} ds, \quad (1)$$

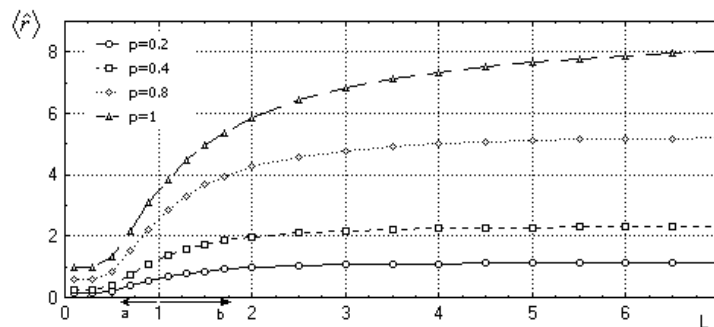
где  $n$  — параметр квантования, от которого зависят метрологические качества АЦП (обычно  $n = 3$ );  $A = L^2(1+s)$ ,  $B = L^2(1-s)$ .

Стандартный режим работы коррелятора с 4-х уровневый АЦП предусматривает установку такого коэффициента усиления РПУ, при котором  $L \approx 1$ . Это позволяет с достаточной точностью определять коэффициент корреляции и уровень измеряемых сигналов.

К сожалению, во многих случаях это условие не соблюдается.

На рис. 2 изображена зависимость выходного сигнала  $\langle \hat{r} \rangle = \langle \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_2 \rangle$  коррелятора от параметров  $L$  и  $\rho$ . На поверхности, определяемой функцией  $\langle \hat{r} \rangle = F(\rho, L)$  можно выделить две характерных области: «боковой склон» и «трамплин».

На боковой области (за исключением ее нижней части) достигается максимальная чувствительность  $\langle \hat{r} \rangle$  к изменениям  $L$ , при достаточно высокой чувствительности к изменению  $\rho$ . Лучшим условиям измерений соответствует  $L = 1$ . Для той части поверхности, которую мы назвали «трамплином», характерна очень слабая чувствительность по параметру  $L$ . Это делает область «трамплина» неприемлемой для измерений мощности «полного» сигнала  $\sigma^2$ . Аналогичная ситуация имеет место в нижней части «склона». Это хорошо иллюстрирует рис. 3, на котором изображена зависимость  $\langle \hat{r} \rangle$  от  $L$  для различных значений  $\rho$ .



**Рис. 3.** Зависимость сигнала  $\langle \hat{r} \rangle$  на выходе коррелятора от параметра  $L$ , при фиксированных значениях коэффициента корреляции  $\rho$

В общем случае для определения мощности исследуемого сигнала  $\sigma_c^2$ , может быть использована следующая методика:

1. Измерение ковариации  $\langle \hat{r} \rangle = \langle \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_2 \rangle$  выходных сигналов АЦП.
2. Измерение мощности «полного» сигнала  $\hat{\sigma}^2 = \langle \hat{x}_1 \cdot \hat{x}_1 \rangle = \langle \hat{x}_2 \cdot \hat{x}_2 \rangle$  на дополнительном выходе коррелятора, когда  $\rho = 1$ .
3. Определение значения  $L$ , путем численного решения уравнения  $\langle \hat{r} \rangle = F(\rho, L)_{\rho=1}$ .
4. Определение мощности «полного» сигнала  $\sigma^2$  на входе радиометра. Для этого используем выражение  $\sigma^2 = v^2 L^2$ .
5. Определение коэффициента корреляции  $\rho$  путем численного решения уравнения  $\langle \hat{r} \rangle = F(\rho, L)_{L=\text{const}}$ . Значение  $L$  определено на этапе 3.
6. Определение мощности исследуемого сигнала с помощью выражения  $\sigma_c = \rho \cdot \sigma^2$ .

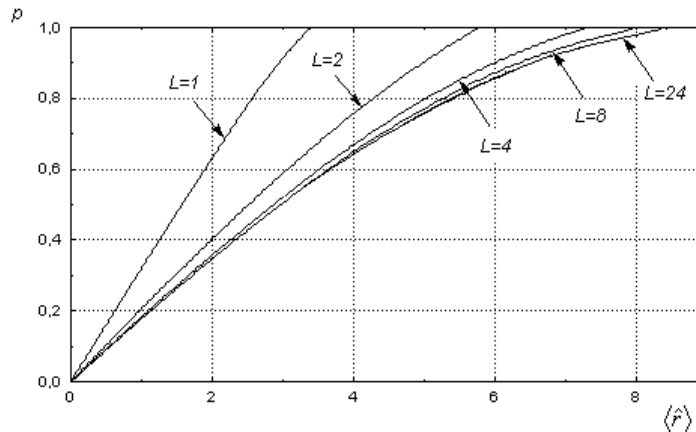
Возможна разновидность предложенной методики, в которой для определения  $\rho$  создается ситуация, когда  $L \geq 8$  (т.е. используется заведомо низкий порог квантования). Коэффициент корреляции  $\rho$  определяется путем численного решения уравнения  $\langle \hat{r} \rangle = F(\rho, L)_{L=\text{const}}$ , где  $L \geq 8$ . Возможность такого подхода иллюстрирует рис. 4, на котором приведена зависимость  $\rho$  от  $\langle \hat{r} \rangle$  при различных значениях  $L$ .

Как уже отмечалось, в декаметровом радиодиапазоне минимальный уровень входных сигналов равен уровню галактического фона. Если мы хотим исследовать относительно слабые всплески, то следует установить усиление РПУ таким, чтобы мощность фона на входе АЦП была равна квадрату порога квантования. Но уже для всплесков, мощность которых в десять раз превышает мощность фона, мы попадаем в область «трамплина». Следовательно, мощность сигналов большей части всплесков будет измерена с большой погрешностью.

Устранить этот недостаток радиометра можно, используя группу порогов квантования с автоматическим переключением АЦП на тот порог, к которому значение  $\sigma$  ближе на текущем интервале времени.

Определим, сколько необходимо порогов квантования и каким образом следует их размещать для перекрытия заданного диапазона интенсивностей входных сигналов. Для этого определим рабочий диапазон значений параметра  $L$ . Как было отмечено, наибольшая чувствительность достигается при  $L = 1$ . Нижнюю границу рабочего диапазона примем равной  $a \cdot L$ , а верхнюю равной  $b \cdot L$  (см. рис. 3). Значения  $a$  и  $b$  выбираем такими, чтобы производная  $\frac{\partial \langle \hat{r} \rangle}{\partial L}$  на краях рабочего диапазона оставалась достаточно большой. Например,  $a = 0.75$  и  $b = 1.5$ .

Условием стыковки соседних рабочих диапазонов ( $aL_i, bL_i$ ) и ( $aL_{i+1}, bL_{i+1}$ ) является равенство



**Рис. 4.** Связь между выходным сигналом коррелятора  $\langle \hat{r} \rangle$  и коэффициентом корреляции входных сигналов  $\rho$ , при различных значениях  $L$

$bL_i = aL_{i+1}$ . Отсюда следует, что

$$L_n = L_1 \left( \frac{b}{a} \right)^{n-1}, \quad (2)$$

где  $n$  — номер рабочего диапазона.

Каждому рабочему диапазону соответствует два порога квантования (положительный и отрицательный, равные по абсолютной величине):

$$v_n = v_1 \left( \frac{b}{a} \right)^{n-1}, \quad -v_n = -v_1 \left( \frac{b}{a} \right)^{n-1}.$$

Динамический диапазон адаптивного АЦП  $D = 20 \log \frac{aL_n}{bL_1}$ . Используя (2), получим:

$$n = \frac{0.05D}{\log(b/a)}, \quad (3)$$

где дробные значения  $n$  округляются до целого в большую сторону. Это выражение, определяет необходимое количество пар порогов квантования (помимо обязательного нулевого порога), обеспечивающих работу при заданном динамическом диапазоне ( $D$ ) входных сигналов. Следует отметить, что  $D_{\min} = 20 \log(b/a)$ . Такой динамический диапазон уже обеспечивается при  $n = 1$ , если используется описанная выше методика измерения.

Самый низкий порог квантования должен соответствовать минимальной мощности галактического фона, среди участков небесной сферы, в которых находятся наблюдаемые объекты. Как правило, определение этой величины для конкретного радиотелескопа требует дополнительных измерений. Поэтому, минимальный уровень фона может быть определен как предполагаемый. Самый высокий порог квантования должен соответствовать самому мощному источнику. Для радиотелескопа УРАН-4, исходя из приведенных соображений, в случае наблюдения компактных галактических и внегалактических радиоисточников, получим динамический диапазон входных сигналов равный 11 дБ. Для радиотелескопов с большей эффективной площадью динамический диапазон принимаемых сигналов увеличивается (за счет относительного уменьшения мощности галактического фона на входе АЦП). Например, для радиотелескопа УРАН-2 [1] до 17 дБ, а для УТР-2[1] до 24 дБ. Как уже отмечалось, при наблюдении солнечных и ионосферных радиовсплесков динамический диапазон входных сигналов может увеличиться еще на 17 дБ и более.

Теперь, используя выражение (3), определим количество пар порогов квантования  $n$ , необходимое для наблюдения компактных радиоисточников и радиовсплесков ( $a = 0.75$ ,  $b = 1.5$ ):  $n = 5$  (УРАН-4);  $n = 6$  (УРАН-2);  $n = 7$  (УТР-2).

Для оценки мощности с относительной погрешностью 10% и выбора порога квантования достаточно ста отсчетов. Таким образом, на сто двухбитовых отсчетов добавляется три бита (точнее, четыре, для сохранения формата записи), указывающие номер используемого порога квантования. То есть поток данных увеличивается не более, чем на 2%, по сравнению с обычным 4-х уровневый АЦП. Применение адаптивного 4-х уровневого АЦП, например, в радиометре радиотелескопа УРАН-4, почти на порядок уменьшает поток данных по сравнению с использованием полноразрядного АЦП, при равном динамическом диапазоне.

1. Брауде С.Я., Мень А.В. Радиоастрономические исследования на Украине в диапазоне декаметровых волн // Радиофизика и радиоастрономия. — 1, № 1. — С. 9–21.
2. Галантин В.В., Инютин Г.А., Кваша И.М. и др. Радиотелескоп УРАН-4 — элемент радиоинтерферометра со сверхдлинной базой // Кинематика и физика небесных тел. — 1989. — 5, № 5. — С. 87.
3. Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковский С.Л. и др. Экспериментальное исследование угловой структуры радиоизлучения квазара 3C196 в декаметровом диапазоне радиоволн // Известия вузов. Радиофизика. — 1990. — 33, № 5. — С. 534–545.
4. Томпсон Р., Морган Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Мир, 1989. — 568 с.

Поступила в редакцию 10.08.2003