

УДК 621.396.967:621.391

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ В ЦИФРОВЫХ РЛС

Д.А. КОВАЛЕВИЧ, П.К. СЕДНЕНКОВ

НП ООО «ОКБ ТСП»
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: kovalevichda@okbtsp.com, sednenkovpc@okbtsp.com

Аннотация. Обосновано применение ступенчатой двухуровневой автоматической регулировки коэффициента передачи аналогового тракта радиоприемных устройств цифровых радиолокационных систем, работающих в односигнальном режиме. Рассмотрены различные способы реализации автоматической регулировки уровня сигнала на входе аналогово-цифрового преобразователя. Предложены подходы к оптимизации системы мгновенной автоматической регулировки усиления, реализованной с применением программируемых логических интегральных схем. Исследовано влияние асинхронной работы предложенной системы на результирующий коэффициент шума.

Abstract. The use of a stepped, two-level automatic gain control for the analog path of digital radar receivers operating in single-signal mode is substantiated. Various methods for implementing automatic signal level control at the analog-to-digital converter input are considered. Approaches to optimizing an instantaneous automatic gain control system implemented using field programmable gate array integrated circuits are proposed. The effect of asynchronous operation of the proposed system on the resulting noise figure is examined.

Введение

Неотъемлемым элементом радиолокационных систем (РЛС) с цифровой обработкой сигналов является аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Решение проблемы согласования динамического диапазона (ДД) аналогового тракта приемника с АЦП существенно отличается от классических подходов к реализации механизмов поддержания уровня принимаемого сигнала в аналоговых РЛС. С одной стороны ДД входных сигналов АЦП достаточно широкий и не требует значительного изменения коэффициента передачи (КП) аналогового тракта. С другой стороны, перегрузка входных каскадов АЦП ведет к полной потере информации о принятом сигнале. Описанные выше особенности применения АЦП требуют учета при проектировании систем автоматической регулировки усиления (АРУ) цифровых радиоприемных устройств (РПУ).

Обоснование требований к АРУ цифровой РЛС

Аналоговый тракт, предшествующий АЦП, обычно включает в себя циркулятор (Ц), фильтр зеркального канала (ФЗК), маломощный усилитель (МШУ), смеситель (СМ), фильтр ПЧ и усилитель ПЧ (таблица 1). Можно условно представить совокупность этих элементов в виде единого структурного блока, который может быть описан такими параметрами, как коэффициент шума (КШ), точка компрессии по входу (IP1dB), точка пересечения интермодуляционных составляющих третьего порядка по входу (ПРЗ) и КП.

Таблица 1. Типовые параметры основных элементов РПУ РЛС S-диапазона

Параметр	Ц	ФЗК	МШУ	СМ	ФПЧ	УПЧ	АЦП
КШ, дБ	0,3...1,0	1...2	0,3...1,0	6...10	2...6	3...10	26...32
IP1dB, дБм	>60	>40	-5...10	5...20	20...36	0...15	6...14
ПРЗ, дБм	-	-	10...30	10...30	-	20...40	45...60
КП, дБ	-0,3...-1,0	-1...-2	15...25	-10...10	-2...-6	6...26	-

ДД АЦП в односигнальном режиме связан с частотой выборок и разрядностью применяемого преобразователя. Однако даже в случае применения самых современных преобразователей их ДД не перекрывает весь диапазон входных сигналов аналоговой части РПУ. В РПУ РЛС нижняя граница

динамического диапазона определяется реализуемой чувствительностью, а верхняя – заданным уровнем IP1dB. Чувствительность в свою очередь рассчитывается на основании полосы частот зондирующего сигнала и КШ РПУ. Как известно, АЦП имеет относительно высокий КШ по сравнению с другими структурными элементами тракта РПУ (около 30дБ для 16 битных устройств [1]). Поэтому суммарный КП аналоговой части тракта должен быть достаточно высоким, чтобы КШ РПУ существенно не отличался от КШ аналогового тракта, при этом вход преобразователя не должен перегружаться при наличии мощных сигналов на входе РПУ.

В общем случае расчет требуемого КП аналоговой части РПУ может быть осуществлен по различным критериям:

- согласование по КШ;
- согласование по уровню IP1dB;
- согласование по уровню IP3.

Согласование КШ аналогового тракта и АЦП в упрощенном виде можно описать следующим выражением:

$$NF_A + G_A = NF_C. \quad (1)$$

В нем NF_A , NF_C – КШ аналогового тракта и АЦП соответственно, G_A – КУ аналогового тракта, выраженные в дБ. Выполнение этого условия означает, что вклады в КШ РПУ аналоговой части тракта и АЦП будут одинаковы, а значит КШ РПУ превысит на $\Delta NF = 3$ дБ КШ аналогового тракта. Для этого случая можно выразить требуемый КП аналогового тракта по формуле:

$$G_A = NF_C - NF_A. \quad (2)$$

Однако такое существенное увеличение КШ не всегда является приемлемым. Можно определить КП аналогового тракта для произвольного приращения ΔNF за счет поправочного коэффициента Δ (таблица 2):

$$G_A = NF_C - NF_A + \Delta. \quad (3)$$

Таблица 2. Значение поправочного коэффициента Δ

ΔNF , дБ	3	2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
Δ , дБ	0	2.3	5.8	6.9	8.2	10.1	13.2	16.3

Согласование по уровню IP1dB и IP3 может быть описано выражениями, аналогичными (2):

$$G_A = IP1dB_C - IP1dB_A; \quad (4)$$

$$G_A = IP3_C - IP3_A. \quad (5)$$

Для односигнальных режимов работы РЛС требования к уровню интермодуляционных искажений обычно не предъявляются. Такая необходимость может возникнуть при учете наличия активных помех либо при проектировании РЛС, работающей в режиме непрерывного излучения [2]. Так как разница между уровнями IP1dB и IP3 для АЦП существенно выше любого структурного элемента аналогового тракта, то согласование по уровню IP1dB автоматически обеспечивает минимальное влияние АЦП на линейность РПУ. Из этого можно сделать вывод о том, что для согласования ДД АЦП и аналогового тракта достаточно реализовать ступенчатую двухуровневую регулировку усиления в тракте ПЧ. Это может быть выполнено за счет применения соответствующей АРУ в тракте ПЧ.

Способы реализации АРУ в РПУ цифровой РЛС

При построении РПУ цифровой РЛС могут использоваться различные подходы к реализации АРУ:

- временная (ВАРУ);
- быстрая (БАРУ);
- мгновенная (МАРУ).

Основная проблема АРУ в РЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР) при использовании цифрового способа формирования диаграммы направленности (ДН) — сохранение требуемого амплитудно-фазового распределения, так как форма и направление основного лепестка ДН зависят от точного соотношения фаз и амплитуд между всеми РПУ.

При использовании ВАРУ усиление изменяется по жестко заданному закону в течение каждого периода зондирования. В случае дискретного изменения КП аналогового тракта реализация такой АРУ сводится к определению момента времени смены КП по отношению к началу излучения зондирующего сигнала.

ВАРУ в РЛС с ФАР может быть реализована на двух уровнях - локальная АРУ в тракте каждого РПУ и централизованная. Централизованная ВАРУ оценивает общую помеховую обстановку и среднюю мощность сигналов на входе РПУ и управляет усилением всей решетки скоординированно, чтобы не исказить ДН антенны. Такой тип АРУ обладает невысоким временем реакции, вследствие чего некоторые приемные устройства могут быть перегружены отражением зондирующего сигнала от крупных местных объектов, расположенных на границе «слепой» зоны РЛС. Результатом такой ситуации может стать искажение формы основного лепестка и рост уровня боковых лепестков ДН (рис. 1).

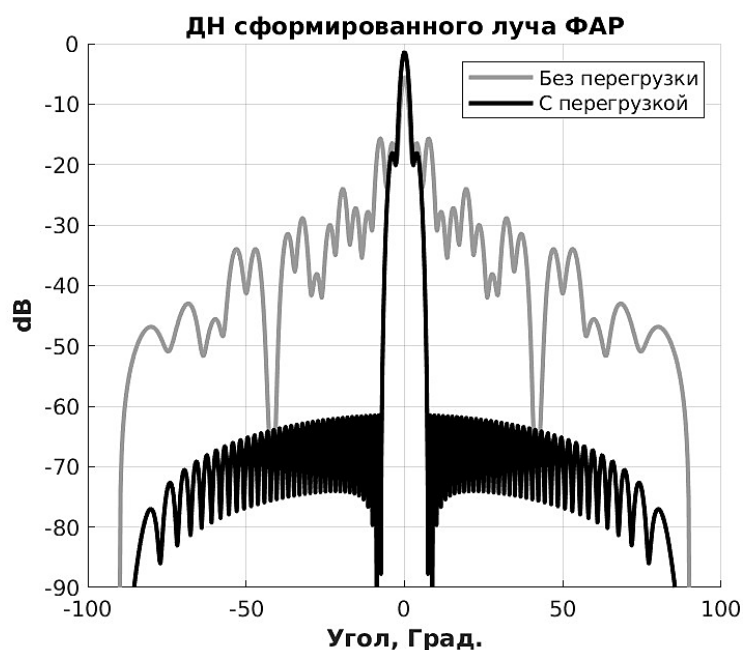


Рис. 1. Результаты моделирования ДН ФАР

Линейные размеры местных объектов, существенно превосходящие разрешающую способность РЛС по азимуту, создают интерференционное распределение уровней сигнала по всему антенному полотну. При использовании механической развертки это распределение постоянно меняется, что может снижать эффективность работы такой АРУ.

Описанные выше подходы требуют наличия механизмов синхронизации переключения КП всех РПУ. С ростом количества элементов ФАР задача синхронизации становится нетривиальной. В этом случае может быть использована автономная ВАРУ. При локальном управлении решение об изменении КП аналогового тракта принимается внутри самого РПУ. Для учета текущего КП применяются калибровочные таблицы, которые масштабируют оцифрованные данные в зависимости от выбранного его значения.

Вне зависимости от выбранного алгоритма, управление КП происходит в аналоговом тракте, предшествующем АЦП. Исполнительным элементом АРУ в современных системах являются цифровые управляемые аттенуаторы, которые могут быть установлены как в тракте высокой частоты (ВЧ), так и в тракте ПЧ непосредственно перед АЦП. Вне зависимости от типа реализуемой АРУ (ВАРУ, локальная либо централизованная ВАРУ) быстродействие такой системы является конечной величиной, что не всегда приемлемо.

Решением этой проблемы может стать применение МАРУ. Одним из вариантов реализации такого подхода является установка логарифмического усилителя в тракт перед АЦП с последующим восстановлением сигнала в цифровой области [3]. Однако аналоговая реализация логарифмического закона не обладает необходимой повторяемостью и стабильностью параметров в широком диапазоне температур.

Так как для согласования ДД АЦП и аналогового тракта РПУ достаточно наличие только двух различных КП, МАРУ может быть реализована с использованием двух параллельных каналов с различными

КП (рис.2). Структурно АРУ представляет собой два однотипных АЦП, работающих от общего источника тактирующего сигнала. Коэффициент передачи аналогового тракта для каждого преобразователя рассчитывается по различным критериям: для одного канала он определяется исходя из условия минимизации КШ РПУ, для второго – исходя из условия согласования по уровню P1dB.

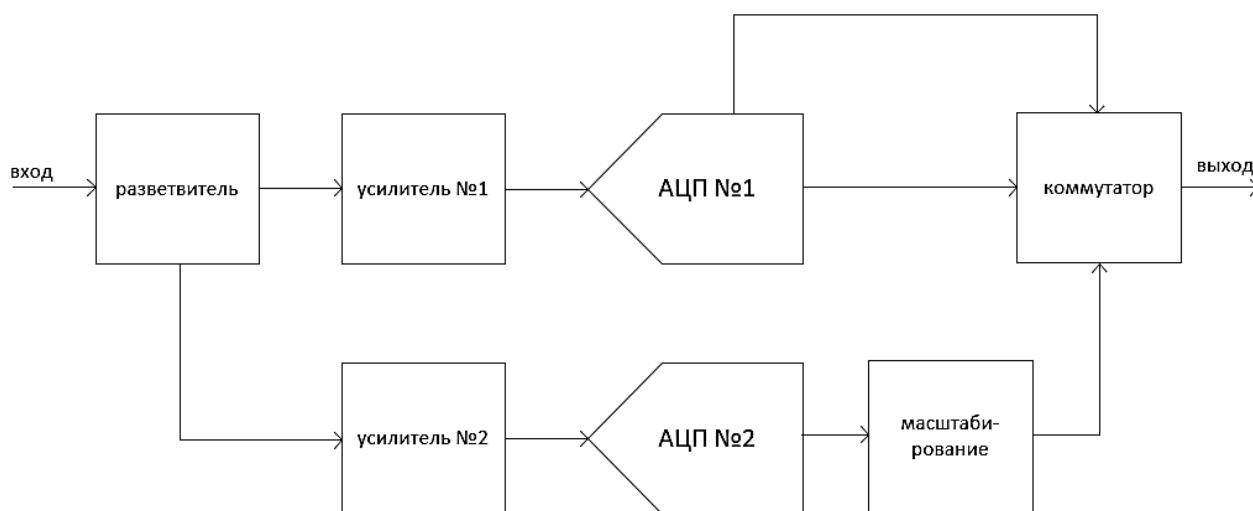


Рис.2. Структура АРУ

Приоритетным источником информации является канал №1 с высоким КП, обеспечивающий требуемый КШ РПУ. Событием, по которому происходит переключение, является признак перегрузки АЦП, обычно представляющий собой отдельный электрический сигнал. В результате применения такого подхода ДД РПУ по полезному сигналу уже не будет ограничен параметрами АЦП, а будет определяться параметрами структурных элементов аналогового тракта.

В случае использования различных принципиальных решений при реализации усилительных каскадов, предшествующих АЦП, может возникнуть необходимость компенсации задержки на распространение сигнала в одном из каналов. Для этого могут быть использованы топологические линии задержки, реализованные рисунком печатной платы.

Основным недостатком такого решения является непостоянство КП структурных элементов аналогового тракта. Чтобы решить эту проблему масштабный коэффициент необходимо определять динамически в процессе работы РПУ. Если сигнал в канале с высоким КП не находится в ограничении, а в канале с низким КП превышает уровень шума более чем на 20 дБ, то масштабный коэффициент может быть рассчитан как отношение уровней в этих каналах.

Оптимизация АРУ

Реализации механизма масштабирования сигнала с применением программируемых логических интегральных схем может потребовать некоторой оптимизации. Самым простым решением является использование целого числа в качестве масштабного коэффициента. Существенно упростить вычисления возможно, если масштабный коэффициент представить в виде степени числа 2 – в таком случае умножение может быть заменено операцией сдвига. Однако такой подход требует точной настройки КП аналоговых трактов и их поддержания в рабочем диапазоне температур и напряжений питания. Для этих целей можно использовать управление опорными напряжениями преобразователей. Обычно производители быстродействующих АЦП предоставляют возможность использовать внешнее опорное напряжение, которое допускается изменять в небольших пределах (3...6 дБ), чего вполне достаточно для компенсации нестабильности параметров аналоговых элементов схемы. Такая подстройка также может осуществляться динамически по аналогии с динамическим определением масштабного коэффициента.

Асинхронная работа МАРУ в РЛС с ФАР

Изменение КП в результате работы описанной системы МАРУ будет вызывать изменение КШ отдельных РПУ из состава ФАР. При этом суммарный КШ РЛС по основному лучу ДН будет повышаться в зависимости от количества РПУ, использующих канал с низким КП. Для оценки влияния работы МАРУ на КШ РЛС произведено моделирование КШ РЛС в среде MATLAB, а результирующая зависимость изображена на рис.3. В приведенном примере КШ РПУ в режиме высокого КП аналогового тракта составляет 3.5 дБ, в режиме низкого – 10 дБ.

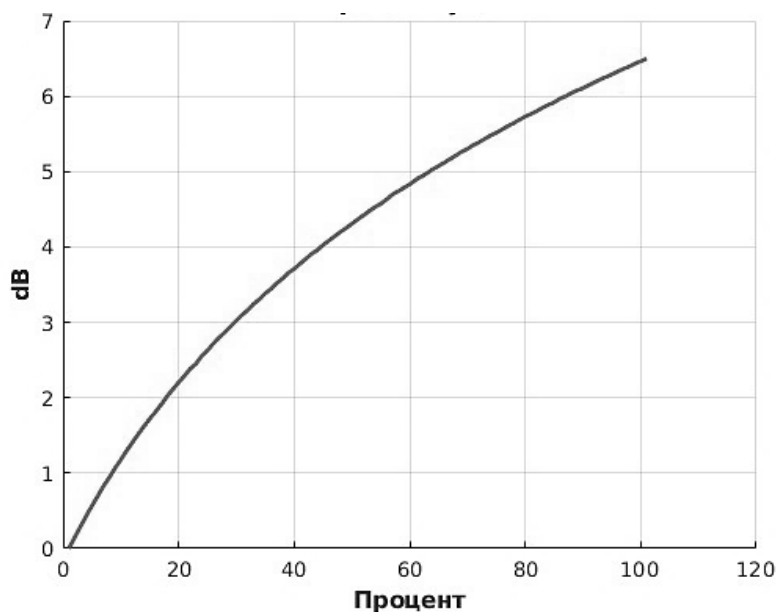


Рис.3. Зависимость увеличения КШ РЛС от процентного состава РПУ с низким КП

Заключение

Предложенный способ определения параметров АРУ для РПУ цифровых РЛС, а также вариант реализации МАРУ с применением двух каналов АЦП могут быть использованы при проектировании различных РЛС, в том числе использующих ФАР.

Список использованных источников

1. Воробьев О.В., Прасолов А.А. Сравнение методов повышения динамического диапазона АЦП цифровых радиоприемных устройств // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 2. С. 61–68.
2. Исследование путей расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ в многосигнальном режиме / С. А. Богданов, П. В. Куприянов, С. В. Николаев, С. А. Петров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 3. С. 85–90.
3. Расширение динамического диапазона СВЧ АЦП с помощью логарифмических усилителей / Г. Алексеев, Д. Морозов, И. Мухин, В. Репин // Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. № 6. С. 94–98.