

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.3>

УДК: 621.396.61

ЦИФРОВЫЕ ПРЕДЫСКАЖЕНИЯ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ТАБЛИЧНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ОБОБЩЕННОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ С ПАМЯТЬЮ

И.Е. Кащенко

**Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники),
644024, Омск, проспект К. Маркса, д. 15**

Статья поступила в редакцию 19 июня 2026 г.

Аннотация. В данной работе рассматривается метод цифровых предсказаний сигнала, основанный на табличной аппроксимации нелинейных амплитудно-зависимых функций обобщенной полиномиальной модели с памятью. Предлагаемый подход предназначен для снижения вычислительной сложности алгоритма ввода цифровых предсказаний при аппаратной реализации в ПЛИС, СБИС и системах на кристалле (СнК). В отличие от прямого вычисления полиномиальных базисных функций, нелинейные множители модели предварительно группируются по задержкам и представляются в виде таблиц аппроксимации (LUT). Это позволяет заменить часть операций возведения в степень и умножения операциями адресации памяти и интерполяции. Показано, что такое преобразование сохраняет структуру модели с памятью, но снижает число арифметических операций, выполняемых в реальном времени. Рассмотрены особенности формирования таблиц, оценка вычислительной сложности и особенности аппаратной реализации предложенного метода.

Ключевые слова: цифровые предсказания, усилитель мощности, обобщенная полиномиальная модель с памятью, GMP, табличная аппроксимация, LUT, ПЛИС, СБИС, СнК.

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Автор для переписки: Кащенко Игорь Евгеньевич, i.kashchenko@inbox.ru

Введение

Современные радиопередающие тракты требуют высокой энергетической и спектральной эффективности усилителей мощности. Работа усилителя вблизи точки насыщения повышает КПД, но усиливает нелинейные искажения, ухудшающие качество передаваемого сигнала при одновременном расширении спектра частот.

Одним из распространенных способов компенсации нелинейных искажений являются цифровые предсказания сигнала [1]. Их эффективность определяется точностью аппроксимации усилителя мощности и вычислительной сложностью алгоритма, выполняемого в реальном времени.

Для широкополосных сигналов важны не только статические нелинейные свойства усилителя, но и динамические – «эффекты памяти». Для их описания применяются полиномиальные модели с памятью, включая обобщенную полиномиальную модель с памятью (GMP-модель) [2, 3], учитывающую основные и перекрестные нелинейные составляющие.

Повышение точности GMP-модели достигается увеличением порядка нелинейности, глубины памяти и числа перекрестных членов. В аппаратной реализации это приводит к росту числа умножителей, логических ресурсов, увеличению энергопотребления.

Поэтому актуальной становится задача преобразования GMP-модели к виду, пригодному для аппаратной реализации. В данной работе используется группировка амплитудно-зависимых множителей по задержкам с их последующим представлением в виде таблиц аппроксимации [5], это заменяет

часть арифметических операций обращением к памяти и позволяет использовать интерполяцию промежуточных значений.

Рассматриваемый способ изменяет способ вычисления нелинейных множителей GMP-модели: вместо прямого формирования полиномиальных базисных функций используются предварительно сформированные таблицы аппроксимации.

Цель данной работы – анализ табличной аппроксимации нелинейных членов модели с памятью для снижения числа арифметических операций при сохранении учета эффектов памяти усилителя мощности.

1. Обобщенная полиномиальная модель с памятью

В качестве аналитического описания нелинейности используется обобщенная полиномиальная модель с памятью (GMP-модель) [3, 4], описывающая амплитудные и фазовые искажения, а также эффекты памяти усилителя мощности.

Для комплексного входного сигнала $x(n)$ выход модели может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} y(n) = & \sum_{m=0}^{M_a} \sum_{p=0}^{P_a} a_{p,m} x(n-m) |x(n-m)|^p \\ & + \sum_{m=0}^{M_b} \sum_{l=1}^{L_b} \sum_{p=1}^{P_b} b_{p,m,l} x(n-m) |x(n-m-l)|^p \\ & + \sum_{m=0}^{M_c} \sum_{l=1}^{L_c} \sum_{p=1}^{P_c} c_{p,m,l} x(n-m) |x(n-m+l)|^p. \end{aligned} \quad (1)$$

Первое слагаемое соответствует основной ветви модели: отсчет $x(n-m)$ умножается на полиномиальную функцию с амплитудой $|x(n-m)|$. Параметры M_a и P_a задают глубину памяти и порядок нелинейности. Второе слагаемое описывает перекрестные члены с запаздывающими амплитудными составляющими $|x(n-m-l)|$. Параметры M_b , P_b и L_b задают глубину памяти, порядок нелинейности и дополнительное запаздывание. Третье слагаемое учитывает перекрестные члены с опережающими амплитудными составляющими $|x(n-m+l)|$. Его размеры задаются параметрами M_c , P_c и L_c .

Комплексные коэффициенты $a_{p,m}$, $b_{p,m,l}$ и $c_{p,m,l}$ определяются при идентификации модели по входным и выходным сигналам усилителя мощности.

Прямое вычисление GMP-модели требует формирования амплитудных степеней, умножения на комплексные коэффициенты и суммирования большого числа членов. Поэтому рост порядка и глубины памяти напрямую увеличивает сложность алгоритма.

2. Преобразование GMP-модели к табличному виду

Отдельные результаты вычисления суммы членов по порядку нелинейности P можно сгруппировать в амплитудно-зависимые комплексные функции. Тогда в реальном времени вычисляются не отдельные полиномиальные члены, а значения заранее сформированных функций от амплитуды сигнала.

Для основной ветви определим функцию через выражение:

$$A_m(r) = \sum_{p=0}^{P_a} a_{p,m} r^p, \quad (2)$$

где $r = |x(n-m)|$. Тогда основная часть модели может быть записана как:

$$y_a(n) = \sum_{m=0}^{M_a} x(n-m) A_m(|x(n-m)|). \quad (3)$$

В этом выражении все коэффициенты основной ветви с одной задержкой m объединяются в функцию $A_m(r)$, которая далее представляется в табличном виде.

Аналогично для перекрестных членов с запаздывающими и опережающими амплитудными составляющими введем выражения:

$$B_{m,l}(r) = \sum_{p=1}^{P_b} b_{p,m,l} r^p, \quad (4)$$

$$C_{m,l}(r) = \sum_{p=1}^{P_c} c_{p,m,l} r^p. \quad (5)$$

Функции $B_{m,l}(r)$ и $C_{m,l}(r)$ соответствуют перекрестным ветвям с запаздывающими и опережающими амплитудными составляющими. Тогда результирующая модель примет вид:

$$\begin{aligned}
y(n) = & \sum_{m=0}^{M_a} x(n-m) A_m(|x(n-m)|) \\
& + \sum_{m=0}^{M_b} \sum_{l=1}^{L_b} x(n-m) B_{m,l}(|x(n-m-l)|) \\
& + \sum_{m=0}^{M_c} \sum_{l=1}^{L_c} x(n-m) C_{m,l}(|x(n-m+l)|).
\end{aligned} \tag{6}$$

В таком виде каждый набор коэффициентов заменяется одной комплексной функцией амплитуды. Эти функции заранее вычисляются в табличном виде и сохраняются в таблицах аппроксимации; индексы m и l определяют выбираемую таблицу.

3. Табличная аппроксимация нелинейных функций GMP-модели

Функции $A_m(r)$, $B_{m,l}(r)$ и $C_{m,l}(r)$ зависят от одного скалярного аргумента – амплитуды соответствующего им отсчета. Поэтому их можно заменить на дискретный набор значений, хранящийся в памяти.

Пусть диапазон изменения аргумента ограничен интервалом:

$$0 \leq r \leq r_{\max}. \tag{7}$$

Значение $r_{\max}$ выбирается с учетом нормировки сигнала. При превышении этого значения аргумент ограничивается верхней границей таблицы, что предотвращает выход за допустимую область аппроксимации.

Интервал $[0, r_{\max}]$ разделяется на Q дискретных уровней. Для равномерного распределения узлы таблицы могут быть заданы выражением:

$$r_i = i\Delta r, \quad \Delta r = \frac{r_{\max}}{Q-1}, \quad i=0,1,\dots,Q-1. \tag{8}$$

Для каждого узла таблицы r_i заранее вычисляются значения амплитудно-зависимых функций:

$$T_A[m,i] = A_m(r_i), \tag{9}$$

$$T_B[m,l,i] = B_{m,l}(r_i), \tag{10}$$

$$T_C[m,l,i] = C_{m,l}(r_i). \tag{11}$$

Индексы m и l определяют ветвь модели, а индекс i – адрес внутри таблицы. В аппаратной реализации адрес формируется уже по заранее квантованной амплитуде входного сигнала.

Для прямого табличного доступа нормированный адрес может быть вычислен как:

$$i_r = \left\lceil \frac{r}{r_{\max}}(Q-1) + \frac{1}{2} \right\rceil, \quad (12)$$

где результат ограничивается диапазоном $0 \leq i_r \leq Q-1$. В этом случае значение функции выбирается из ближайшего табличного узла:

$$A_m(r) \approx T_A[m, i_r]. \quad (13)$$

Аналогично выполняется обращение к таблицам T_B и T_C . При прямом доступе после вычисления адреса значение множителя считывается непосредственно из памяти.

4. Оценка вычислительной сложности реализации табличной аппроксимации нелинейных функций GMP-модели

Сложность алгоритма определяется числом операций, выполняемых за один отсчет. Для сравнения прямой и табличной реализаций GMP-модели рассмотрим число полиномиальных членов, комплексных умножений, число обращений к памяти, а также размер таблиц аппроксимации.

В исходной GMP-модели количество полиномиальных базисных функций равно:

$$N_{\text{GMP}} = (M_a + 1)(P_a + 1) + (M_b + 1)L_b P_b + (M_c + 1)L_c P_c. \quad (14)$$

Первое слагаемое соответствует основной ветви, второе и третье – перекрестным ветвям с запаздывающими и опережающими амплитудными составляющими соответственно.

При прямом вычислении GMP-модели каждый член требует формирования амплитудного множителя, умножения на комплексный

коэффициент и суммирования. Поэтому число комплексных умножений оценивается величиной N_{GMP} .

После группировки коэффициентов по задержкам и перехода к табличному представлению количество обрабатываемых ветвей определяется выражением:

$$N_{\text{br}} = (M_a + 1) + (M_b + 1)L_b + (M_c + 1)L_c. \quad (15)$$

Каждая ветвь соответствует одной табличной функции. После вычитки значения из таблицы выполняется одно комплексное умножение на один отсчет $x(n - m)$, поэтому:

$$N_{\text{LUT}} = N_{\text{br}}. \quad (16)$$

Относительное снижение числа комплексных умножений по сравнению с прямой реализацией можно записать как:

$$K_{\text{mul}} = \frac{N_{\text{GMP}}}{N_{\text{LUT}}} = \frac{(M_a + 1)(P_a + 1) + (M_b + 1)L_b P_b + (M_c + 1)L_c P_c}{(M_a + 1) + (M_b + 1)L_b + (M_c + 1)L_c}. \quad (17)$$

Выигрыш возрастает с увеличением порядков нелинейности: порядок модели влияет на предварительное формирование таблиц аппроксимации, но не увеличивает число основных комплексных умножений, выполняемых в реальном времени.

Табличный подход также исключает вычисление степенных множителей r^p в реальном времени: они осуществляются в процессе формирования таблиц.

Для прямого табличного доступа число обращений к памяти на один отсчет можно оценить как:

$$N_{\text{addr}} = N_{\text{br}}. \quad (18)$$

При линейной интерполяции для каждой ветви считываются два соседних значения:

$$N_{\text{addr,int}} = 2N_{\text{br}}. \quad (19)$$

Интерполяция требует дополнительных операций с дробным коэффициентом μ , что учитывается при выборе архитектуры.

Объем памяти, необходимый для хранения таблиц, определяется числом табличных функций и числом уровней квантования аргумента. При использовании Q уровней для каждой функции число комплексных табличных значений составляет:

$$N_{\text{mem}} = QN_{\text{br}} = Q \left[(M_a + 1) + (M_b + 1)L_b + (M_c + 1)L_c \right]. \quad (20)$$

Если каждое комплексное значение хранится в памяти с разрядностью B бит для действительной части и B бит для мнимой части, общий объем памяти будет равен:

$$V_{\text{mem}} = 2BN_{\text{mem}}. \quad (21)$$

Таким образом, предлагаемое преобразование заменяет часть арифметической сложности использованием памяти. Увеличение размерности таблицы (Q) повышает точность, но увеличивает объем таблиц; уменьшение Q дает обратный эффект

5. Идентификация коэффициентов и формирование таблиц аппроксимации для GMP-модели

Таблицы аппроксимации формируются после определения коэффициентов исходной GMP-модели. Для этого по измеренным или смоделированным данным составляется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно искоемых комплексных коэффициентов, а затем найденные коэффициенты используются для вычисления таблиц аппроксимации.

Пусть заданы обучающая последовательность (исходный сигнал) $x(n)$ и целевая последовательность $d(n)$ (сигнал с выхода усилителя мощности). Для каждого отсчета по известному сигналу вычисляются элементы системы, соответствующие членам GMP-модели.

Для основной ветви элементы системы имеют вид:

$$\psi_{p,m}^{(a)}(n) = x(n-m) |x(n-m)|^p. \quad (22)$$

Для перекрестных ветвей с запаздывающими и опережающими амплитудными составляющими соответственно:

$$\Psi_{p,m,l}^{(b)}(n) = x(n-m) |x(n-m-l)|^p, \quad (23)$$

$$\Psi_{p,m,l}^{(c)}(n) = x(n-m) |x(n-m+l)|^p. \quad (24)$$

Эти значения образуют матрицу системы Ψ , строки которой соответствуют временным отсчетам, а столбцы – членам GMP-модели. Вектор неизвестных коэффициентов обозначим через θ .

В матричном виде система может быть записана как:

$$\Psi\theta = d, \quad (25)$$

где d – вектор целевых отсчетов. В общем случае система переопределена, поэтому решение записывается через псевдообратную матрицу:

$$\hat{\theta} = \Psi^+ d, \quad (26)$$

где Ψ^+ – псевдообратная матрица к Ψ . На практике псевдообращение может выполняться с использованием сингулярного разложения или другой устойчивой процедуры.

Если матрица Ψ плохо обусловлена, может использоваться регуляризованная форма псевдообращения. Один из вариантов записи имеет вид:

$$\hat{\theta} = (\Psi^H \Psi + \lambda I)^{-1} \Psi^H d, \quad (27)$$

где λ – параметр регуляризации, I – единичная матрица, $(\cdot)^H$ – эрмитово сопряжение. Регуляризация снижает чувствительность решения к шуму и плохой обусловленности матрицы.

После определения вектора $\hat{\theta}$ выполняется переход от полиномиального описания к табличному. Для каждого узла сетки r_i , определенного в разделе о табличной аппроксимации, вычисляются значения функций:

$$A_m(r_i) = \sum_{p=0}^{P_a} a_{p,m} r_i^p, \quad (28)$$

$$B_{m,l}(r_i) = \sum_{p=1}^{P_b} b_{p,m,l} r_i^p, \quad (29)$$

$$C_{m,l}(r_i) = \sum_{p=1}^{P_c} c_{p,m,l} r_i^p. \quad (30)$$

Полученные значения записываются в таблицы аппроксимации:

$$T_A[m,i]=A_m(r_i), \quad T_B[m,l,i]=B_{m,l}(r_i), \quad T_C[m,l,i]=C_{m,l}(r_i). \quad (31)$$

Коэффициенты используются только при предварительном формировании таблиц. В реальном времени алгоритм обращается к уже вычисленным комплексным значениям табличных функций.

При изменении режима работы усилителя система может быть составлена заново, после чего обновляются только значения таблиц аппроксимации, а структура вычислительного тракта остается неизменной

6. Особенности аппаратной реализации предлагаемого метода цифровых предсказаний

При реализации в ПЛИС, СБИС или системе на кристалле табличная GMP-модель разбивается на блок задержек, блок вычисления аргумента, формирователь адресов, память таблиц аппроксимации, комплексные умножители и сумматор [6, 7]. Обобщенная структурная схема показана на рисунке 1.

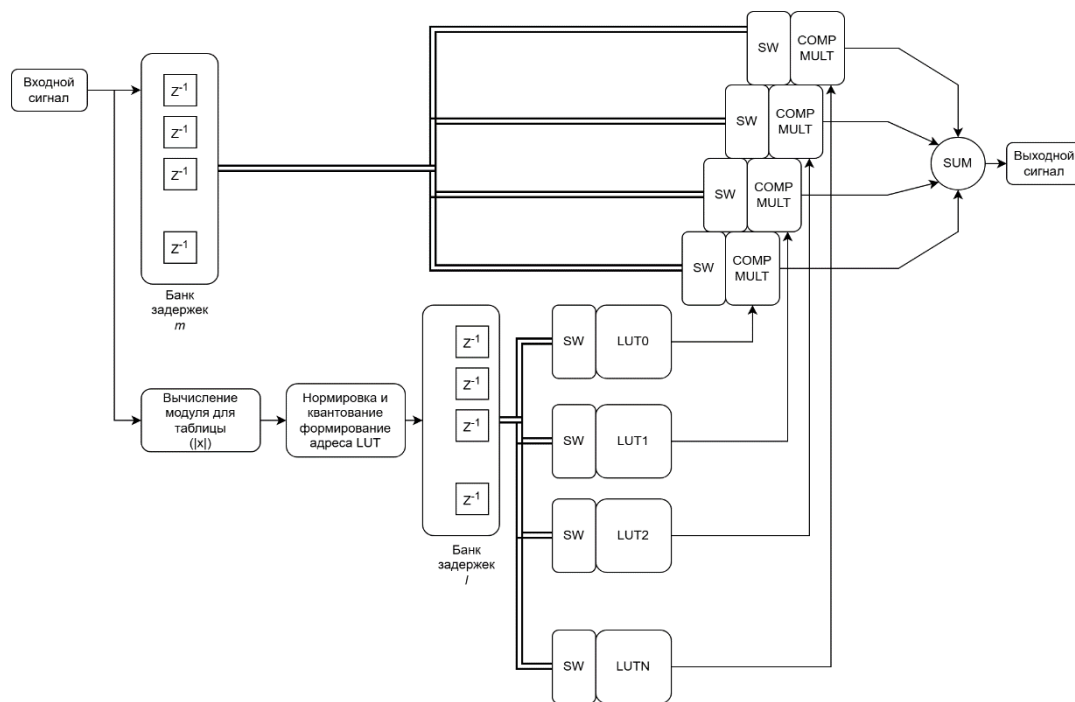


Рис. 1. Структурная схема аппаратной реализации табличной GMP-модели.

Блок задержек формирует отсчеты $x(n-m)$, а также значения, необходимые для запаздывающих и опережающих амплитудных составляющих. Глубина линии задержки определяется параметрами M_a , M_b , M_c , L_b и L_c .

Блок вычисления аргумента формирует амплитуду $r=|x(n)|$. Формирователь адресов выполняет нормировку и ограничение размера таблицы, а также квантование до требуемого уровня.

Таблицы аппроксимации содержат комплексные значения функций A_m , $B_{m,l}$, $C_{m,l}$ и могут размещаться в блочной памяти, распределенной памяти или ОЗУ-блоках.

Для каждой ветви из памяти считывается комплексный множитель, который умножается на соответствующий отсчет $x(n-m)$. Результаты ветвей суммируются. Полностью параллельная реализация обеспечивает максимальную производительность, но требует больше вычислительных ресурсов.

При ограниченных ресурсах возможна частично параллельная или последовательная обработка ветвей с повторным использованием умножителей и блоков памяти. Это уменьшает аппаратные ресурсы, но увеличивает задержку или требования к внутренней тактовой частоте.

Для построения модели усилителя мощности и последующей идентификации GMP-модели DPD использовался реальный усилитель мощности с рабочим диапазоном частот от 30 МГц до 1200 МГц и выходной мощностью 5 Вт. Параметры GMP-модели и количество коэффициентов, определялись по результатам моделирования. Критерием выбора параметров является минимизация NMSE и ACLR при сравнении исходного сигнала с сигналом на выходе модели.

Практический выигрыш табличной аппроксимации можно увидеть на примере GMP-модели с параметрами: $M_a = 4$; $P_a = 5$; $M_b = 1$; $P_b = 3$; $L_b = 1$; $M_c = 7$; $P_c = 2$; $L_c = 2$; что соответствует 51 полиномиальному члену. Количество параметров определено поисковым методом на основе алгоритмов

оценки случайных кандидатов и жадной локальной оптимизации. На рисунке 2 представлены результаты поиска оптимального с точки зрения метрики ACLR количества параметров GMP-модели.



Рис. 2. Результаты поиска оптимального с точки зрения метрики ACLR количества параметров GMP-модели.

Прямая реализация требует математической обработки 51 слагаемых и в параллельном варианте – до 51 комплексных умножителей на отсчет. Классическая табличная реализация с отдельной таблицей на каждый член также требует 51 таблиц и сохраняет такое же число умножений.

При $Q = 1024$ и ширине значения таблицы 32 бита это дает 52224 табличных значения, или около 1671168 бит памяти. Такая схема снижает сложность вычисления нелинейных функций, но не уменьшает число комплексных умножителей.

При группировке членов в обобщенные табличные ветви их число уменьшается до $J = 8$. Число комплексных умножений снижается с 51 до 8, что соответствует выигрышу примерно в 6.5 раз.

Компактная организация табличных банков дополнительно уменьшает число таблиц с 51 до 19, а объем памяти – до 622592 бит, что дает экономию около 62 %.

Для рассмотренного варианта NMSE составляет около -68.9 дБ, что указывает на малую ошибку относительно исходной модели при существенном снижении числа умножителей и объема памяти. Результаты анализа влияния глубины таблиц для разреженной модели с 51 активным членом и 19 активными таблицами представлены в таблице.

Таблица 1. Влияние размера таблицы LUT на точность табличной аппроксимации.

Q (размер LUT)	NMSE, дБ	ACLR, дБ	Δ ACLR, дБ
128	-52,49	44,917	-0,301
256	-61,44	45,108	-0,110
512	-66,36	45,172	-0,046
1024	-68,25	45,198	-0,021
2048	-68,81	45,209	-0,009

Из приведенных в таблице 1 данных видно, что увеличение точности достигается в диапазоне $Q = 512\text{--}1024$. Дальнейшее увеличение размера таблицы дает небольшой дополнительный выигрыш, но приводит к пропорциональному росту объема памяти

7. Особенности аппаратной реализации предлагаемого метода цифровых предсказаний

Оценка качества должна учитывать точность табличной аппроксимации, качество линеаризации и аппаратные ресурсы.

В качестве тестового воздействия использовался сигнал E-TM 3.1 (E-UTRA Test Model 3.1), относящийся к стандартным тестовым моделям нисходящего LTE-сигнала для проверки передатчиков базовых станций [9]. Такой сигнал имеет OFDM-структуру E-UTRA и содержит фиксированную

ресурсную сетку с физическими каналами, опорными сигналами и высокой загрузкой ресурсной сетки. Поэтому его целесообразно использовать для оценки ACLR, EVM.

При моделировании для сигнала E-TM 3.1 использовалось с ограничение пик-фактора до 8 дБ. Ограничение $CF \leq 8$ дБ соответствует типам сигналов, используемых в передающих трактах для повышения эффективности работы усилителя. При этом сигнал сохраняет высокую динамику огибающей, что позволяет использовать его для оценки качества линеаризации и уровня внеполосных составляющих.

Основным показателем точности модели является нормированная среднеквадратичная ошибка между эталонным сигналом $y_{\text{ref}}(n)$ и выходом модели $y(n)$:

$$NMSE = 10 \log_{10} \frac{\sum_n |y_{\text{ref}}(n) - y(n)|^2}{\sum_n |y_{\text{ref}}(n)|^2}. \quad (32)$$

При анализе табличной аппроксимации эталоном может служить выход исходной GMP-модели с прямым вычислением полиномиальных членов. Тогда NMSE отражает ошибку квантования, ограниченной разрядности и интерполяции.

Для оценки качества цифровых предсказаний оценивался уровень мощности в соседних каналах (ACLR).

В общем виде показатель мощности в соседнем канале может быть записан как:

$$ACLR = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{main}}}{P_{\text{adj}}}, \quad (33)$$

где P_{main} – мощность в основном канале, а P_{adj} – мощность в соседнем канале.

При сравнении прямой и табличной реализаций оценивалось влияние размера таблиц Q . На рисунке представлены спектры сигналов на выходе модели усилителя с использованием различных GMP-моделей. Из приведенных данных видно, что при уменьшении размера таблиц аппроксимации основное ухудшение

ACLR наблюдается только при значениях $Q = 128$. Однако существенное увеличение мощности шума в дальней зоне спектра (при отстройке 100 МГц и более) происходит уже при $Q = 1024$.

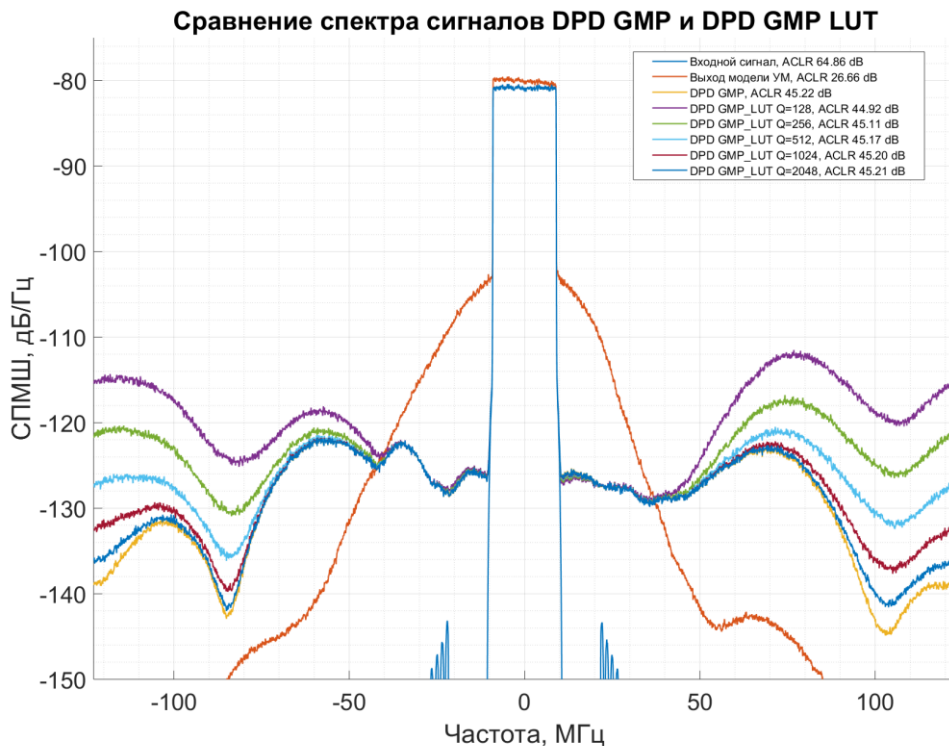


Рис. 3. Спектры сигналов на выходе модели усилителя с использованием различных вариаций GMP-моделей цифровых предискажений.

Для аппаратной реализации учитываются число комплексных умножителей, объем памяти, обращения к памяти на отсчет, задержка, тактовая частота и энергопотребление. Итоговая оценка должна совместно учитывать сигнальные критерии (NMSE, ACLR) и аппаратные ресурсы: число умножителей, память, задержку, пропускную способность и энергопотребление.

Заключение

В работе рассмотрен метод цифровых предискажений, основанный на табличной аппроксимации нелинейных функций обобщенной полиномиальной модели с памятью (GMP-модели). Метод использует группировку полиномиальных членов по задержкам и перекрестным ветвям с последующим представлением полученных функций в виде таблиц аппроксимации.

Преобразование сохраняет структуру GMP-модели, но заменяет прямое вычисление степенных амплитудных функций обращением к памяти и умножением табличного значения на соответствующий отсчет.

Рассмотрены преобразование модели, дискретизация аргумента, формирование таблиц, оценка сложности, определение коэффициентов через СЛАУ и особенности аппаратной реализации. Показано, что выигрыш связан с заменой части арифметических операций обращениями к памяти.

Эффективность предлагаемого метода следует оценивать совместно с показателями нормализованной среднеквадратичной ошибки и уровня мощности в соседнем канале, а также оценкой аппаратных ресурсов: число умножителей, размер памяти, задержка исполнения, пропускная способность и энергопотребление.

Дальнейшая работа может быть связана с оптимизацией числа уровней таблиц, интерполяции, выбора аргумента и разрядности представления.

Финансирование: Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Литература

1. Kim J., Konstantinou K. Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory // Electronics Letters. – 2001. – Т. 37. – №. 23. – С. 1417-1418. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.822188>
2. Ding L. et al. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials // IEEE Transactions on communications. – 2004. – Т. 52. – №. 1. – С. 159-165. <https://doi.org/10.1049/el:20010940>
3. Morgan D.R. et al. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers // IEEE Transactions on signal processing. – 2006. – Т. 54. – №. 10. – С. 3852-3860. <https://doi.org/10.1109/TSP.2006.879264>
4. Ghannouchi F.M., Hammi O. Behavioral modeling and predistortion // IEEE Microwave magazine. – 2009. – Т. 10. – №. 7. – С. 52-64. <https://doi.org/10.1109/MMM.2009.934516>

5. Campo P.P. et al. Gradient-adaptive spline-interpolated LUT methods for low-complexity digital predistortion // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2020. – Т. 68. – №. 1. – С. 336-349.
<https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3034825>
6. Кащенко И.Е. Система ввода цифровых предсказаний на основе обобщенной полиномиальной модели с памятью для GaN усилителей мощности // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 10.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.6> (In Russian)
7. Versluis M., Wu Y., Gao C. SparseDPD: A sparse neural network-based digital predistortion FPGA accelerator for RF power amplifier linearization // arXiv preprint arXiv:2506.16591. – 2025. <https://doi.org/10.1109/FPL68686.2025.00031>
8. 3GPP TS 38.104. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception. – Version 18.10.0. – 2024. – URL:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/18.10.00_60/ts_138104v181000p.pdf
9. 3GPP TS 36.141. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) conformance testing. – URL:
https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.141/

Для цитирования:

Кащенко И.Е. Цифровые предсказания сигнала на основе табличной аппроксимации обобщенной полиномиальной модели с памятью // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 8.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.3>