

УДК 621.396.962(045)

Л. Т. Перевезенцев, канд. техн. наук

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЪЕДИНЕНИЯ КВАДРАТУРНЫХ КАНАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ СЕЛЕКЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ

Институт электроники и систем управления НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

*Приведен анализ схемных решений объединения квадратурных каналов радиолокационных систем селекции движущихся целей по критерию «эффективность – стоимость».***Ключевые слова:** квадратурные каналы, объединение, алгоритмы, критерии, погрешность, стоимость.

Введение. Неотъемлемой частью современных первичных радиолокационных станций, предназначенных для управления воздушным движением, является когерентно-импульсные системы селекции движущихся целей (СДЦ). Обработка сигналов в этих системах производится двумя отдельными квадратурными каналами, получившими условные наименования «синусных» и «косинусных» [1]. После раздельной обработки сигналов в этих каналах сигналы объединяются в соответствии с алгоритмом

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_{\sin}^2 + U_{\cos}^2}, \quad (1)$$

где $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$ – сигналы соответственно в «синусном» и «косинусном» каналах; U_{Σ} – сигнал в объединенном (суммарном) канале.

В цифровых системах СДЦ все операции обработки производятся не с аналоговыми сигналами, а с их числовым безразмерным эквивалентом. Это позволяет, используя ряд элементарных операций над числами, таких как сложение, вычитание, умножение, запоминание, реализовать любой по сложности алгоритм обработки сигналов и осуществить эту обработку в реальном масштабе времени, т. е. по мере поступления входной аналоговой информации.

Важным преимуществом цифровых систем СДЦ является высокая степень стабильности их характеристик во времени при изменении питающих напряжений и условий окружающей среды. Кроме того цифровые системы принципиально могут обеспечить более высокую точность выполнения необходимых алгоритмов обработки сигналов. Вместе с тем в некоторых случаях цифровые методы проигрывают аналоговым в стоимости реализации соответствующих технических решений при заданных параметрах функционирования изделия. В частности, при разработке устройств объединения квадратурных каналов систем СДЦ явно просматривается конфликт между качеством параметров изделия и стоимостью его реализации.

Анализ основных исследований и публикаций по рассматриваемой проблеме. Двухканальные системы СДЦ содержат два аналогичных квадратурных канала: «синусный» и «косинусный», каждый из которых начинается с фазового детектора [1]. На вход одного из детекторов подается синусоидальное опорное напряжение, а на другой – косинусоидальное опорное напряжение той же частоты. Радиолокационный сигнал подается на оба фазовых детектора синфазно. В каждом из квадратурных каналов имеются устройства стробирования, фиксации, аналого-цифровые преобразователи, цифровые устройства череспериодной компенсации или цифровые фильтры. Оконечным устройством квадратурной системы СДЦ является экстрактор модуля, выполняющий операцию объединения сигналов в соответствии с одним из алгоритмов, имитирующим операцию, описываемую уравнением (1). После экстрактора модуля сигналы подвергаются испытаниям на фиксированные и адаптивные пороги, хранящиеся в ячейках памяти динамических карт помех [2].

Объединение цифровых сигналов квадратурных каналов системы СДЦ в реальном масштабе времени по закону, описываемому уравнением (1), вызывает значительные

трудности. Поэтому для технической реализации схем экстракторов модуля обычно используют упрощенные алгоритмы, исключая операции возведения в квадрат и извлечения квадратного корня из суммы квадратов объединяемых сигналов [3]. Эти алгоритмы содержат более простые и удобные для реализации логические операции (суммирование, вычитание, сравнение, мультиплексирование, определение абсолютного значения числа). Некоторые из используемых в настоящее время алгоритмов просты в схемной реализации, но результат сложения сигналов может при определенных условиях значительно отличаться от результата, полученного при использовании уравнения (1). Такого рода погрешность приводит к нежелательной модуляции пачки обрабатываемых отраженных сигналов и, в конечном итоге, к уменьшению вероятности правильного обнаружения и увеличению вероятности пропуска целей.

Постановка задачи. На этапе проектирования устройств обработки радиолокационных сигналов в системах СДЦ возникает проблема поиска алгоритма объединения квадратурных сигналов как компромисса между величиной аппаратных затрат, необходимых для схемной реализации выбранного алгоритма, и относительной погрешностью, возникающей при объединении сигналов согласно выбранному алгоритму. Для принятия решения необходимо рассмотреть наиболее реальные алгоритмы объединения квадратурных сигналов, вычислить максимальную относительную погрешность отклонения принятого алгоритма от идеального, описываемого уравнением (1), и определить материальные затраты, необходимые для реализации выбранного алгоритма.

Оценка относительной погрешности принятых алгоритмов объединения квадратурных сигналов. Относительная погрешность принятого алгоритма по сравнению с идеальным алгоритмом зависит от соотношения объединяемых сигналов $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$. Относительная погрешность, выраженная в процентах, может быть определена с помощью выражения

$$\sigma_i \left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right) \% = \frac{\left| f_i \left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right) - f_0 \left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right) \right|}{f_0 \left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right)} \cdot 100,$$

где $\sigma_i \left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right) \%$ – относительная погрешность принятого алгоритма; $f_i \left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right)$ – выбранный для сравнения алгоритм объединения квадратурных сигналов; $f_0 \left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right)$ – идеальный алгоритм объединения квадратурных сигналов.

Можно разработать сколь угодно точные алгоритмы объединения квадратурных каналов системы СДЦ, но при этом усложняется их техническая реализация и увеличиваются необходимые аппаратные затраты. Ниже будут рассмотрены только те алгоритмы, которые могут найти практическое применение.

Вариант 1. Сложение абсолютных значений сигналов $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$:

$$U_{1\Sigma} = |U_{\sin}| + |U_{\cos}|. \quad (2)$$

Относительная максимальная погрешность объединения сигналов $\sigma_{1 \max}$ будет при этом равна 41 %.

Вариант 2. Выбирается большее из абсолютных значений чисел $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$:

$$U_{2\Sigma} = \left\{ \left[|U_{\sin}|, \text{ если } |U_{\sin}| \succ |U_{\cos}| \right] \text{ или } \left[|U_{\cos}|, \text{ если } |U_{\cos}| \succ |U_{\sin}| \right] \right\}. \quad (3)$$

Относительная максимальная погрешность объединения сигналов $\sigma_{2\max}$ будет при этом также равна 41 %.

Вариант 3. Выбирается большее из абсолютных значений сигналов $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$ и складывается с половиной меньшего из абсолютных значений:

$$U_{3\Sigma} = |S| + \frac{1}{2}|L|, \quad (4)$$

где $|S| = \max\{|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|\}$; $|L| = \min\{|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|\}$.

Максимальная относительная погрешность $\sigma_{3\max} = 11,6\%$.

Вариант 4. Берется сумма абсолютных значений двух сигналов $|U_{\sin}|$ и $|U_{\cos}|$, складывается с большим абсолютным значением этих сигналов и делится на 2:

$$U_{4\Sigma} = \frac{|U_{\sin}| + |U_{\cos}| + \max\{|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|\}}{2}. \quad (5)$$

В принципе это тот же вариант 3, но с иной технической реализацией.

Максимальная относительная погрешность будет составлять те же 11,6 %.

Вариант 5. Выбирается большее из большего абсолютного значения сигналов $|U_{\sin}|$ и $|U_{\cos}|$ или сумма абсолютных значений этих сигналов, деленная на $\sqrt{2}$:

$$U_{5\Sigma} = \max\left\{\max[|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|] \text{ или } \frac{|U_{\sin}| + |U_{\cos}|}{\sqrt{2}}\right\}. \quad (6)$$

Максимальная относительная погрешность $\sigma_{5\max} = 7,9\%$.

Вариант 6. Выбирается большее из абсолютных значений сигналов $|U_{\sin}|$ и $|U_{\cos}|$ или сумма большего из них, умноженного на 7/8, и меньшего, умноженного на 1/2:

$$U_{6\Sigma} = \max\left\{\max[|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|] \text{ или } \left[\frac{7}{8}|S| + \frac{1}{2}|L|\right]\right\}, \quad (7)$$

где $|S| = \max\{|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|\}$; $|L| = \min\{|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|\}$.

Относительная максимальная погрешность при этом составляет 3,64 %.

Вариант 7. Выбирается большее из абсолютных значений сигналов $|U_{\sin}|$ и $|U_{\cos}|$ или сумма большего из них, умноженная на 7/8, плюс меньшего, умноженного на 1/2, или сумма $|U_{\sin}|$ и $|U_{\cos}|$, деленная на $\sqrt{2}$:

$$U_{7\Sigma} = \max\left\{\max[|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|] \text{ или } \left[\frac{7}{8}|S| + \frac{1}{2}|L|\right] \text{ или } \frac{|U_{\sin}| + |U_{\cos}|}{\sqrt{2}}\right\}, \quad (8)$$

где $|S| = \max\{|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|\}$; $|L| = \min\{|U_{\sin}| \text{ или } |U_{\cos}|\}$.

Максимальная относительная погрешность для этого алгоритма будет составлять 2,4 %.

Дальнейшие поиски более точных алгоритмов не имеют смысла, так как полученные значения точности сопоставимы с уровнем шумов и аппаратными флуктуациями, вызванными нестабильностью параметров схем.

Оценка алгоритмов объединения квадратурных каналов по аппаратным затратам. Для проведения оценки алгоритмов объединения квадратурных каналов по аппаратным затратам были составлены функциональные, а затем и принципиальные схемы технической реализации каждого из семи алгоритмов. Схемы составлены на базе цифровых элементов. В состав принципиальных схем входят стандартные элементы И, И-НЕ, ИЛИ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и более сложные элементы средней степени интеграции:

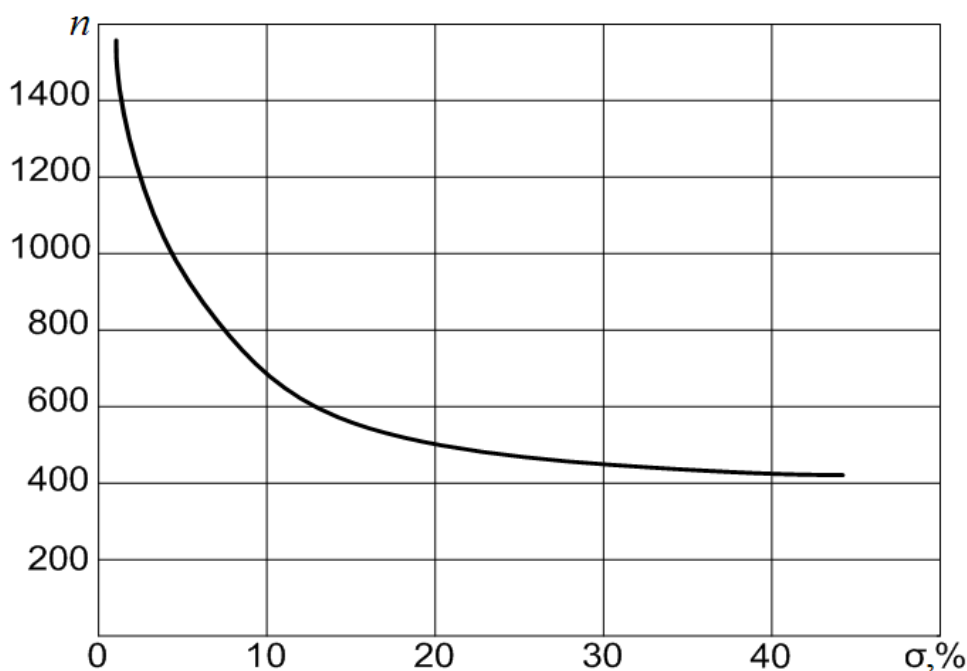
полные сумматоры, умножители, компараторы, мультиплексоры. Для всех вариантов принималась одинаковая типовая разрядность объединяемых входных сигналов, равная восьми. Поскольку более сложные интегральные схемы обычно состояются из простых базовых логических элементов И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ, то для более объективной оценки аппаратных затрат, необходимых для реализации каждого из семи алгоритмов, все разработанные схемы были представлены в виде набора простых логических элементов. Результаты расчета аппаратных затрат для семи рассмотренных выше вариантов представлены в таблице в виде зависимости необходимого количества логических элементов от номера варианта алгоритма. При этом все четыре логических элемента по сложности их схемной реализации считаются одинаковыми.

Количество логических элементов n , необходимое для технической реализации N -го варианта алгоритма объединения сигналов

N	1	2	3	4	5	6	7
n	390	448	578	652	960	972	1430

Оценка эффективности алгоритмов объединения квадратурных сигналов.

Наиболее рациональным методом оценки эффективности принятия того или иного технического решения является технико-экономический подход, когда увеличение показателей качества изделия относят к цене, которую нужно заплатить за получение соответствующего прироста качества. Применительно к решаемой задаче это означает, что оценка эффективности алгоритмов объединения квадратурных каналов и соответственно выбор построения электрических схем должен производиться на основе сопоставления полученной точности объединения квадратурных затрат, необходимых для получения этой точности. С этой целью был проведен анализ результатов, полученных с помощью выражений (2) – (8), и данных, содержащихся в таблице. В наиболее наглядном виде результат этого анализа представлен на рисунке в виде зависимости количества логических элементов n , необходимых для технической реализации устройства объединения, от соответствующей погрешности объединения сигналов σ %.



Зависимость количества логических элементов n от погрешности объединения сигналов σ

Из рисунка видно, что для обеспечения относительной максимальной погрешности объединения квадратурных сигналов менее 5 % необходимо значительно увеличивать аппаратные затраты.

Выводы и рекомендации. Объединение квадратурных каналов в цифровых системах СДЦ производится по приближенным алгоритмам, так как при работе в реальном масштабе времени объединение сигналов по квадратичному правилу реализовать на практике сложно. С ростом точности объединения квадратурных сигналов растут аппаратные затраты. Практически использовать алгоритмы с максимальной относительной погрешностью объединения сигналов менее 5 % нецелесообразно. Полученные зависимости точности объединения квадратурных сигналов от аппаратных затрат позволяют по заданным требованиям к эффективности систем СДЦ выбирать наиболее предпочтительный из рассмотренных выше алгоритм объединения сигналов.

Список литературы

1. Бакулев П. А. М. Методы и устройства селекции движущихся целей / П. А. Бакулев, В. М. Степин – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
2. Качан В. К. Радиооборудование автоматизированных систем управления воздушным движением / В. К. Качан, Л. Т. Перевезенцев, В. В. Сокол – К.: Выща шк. – 1984. – 312 с.
3. Перевезенцев Л. Т. Радиолокационные системы аэропортов: учеб. для вузов гражданской авиации / Л. Т. Перевезенцев, В. Н. Огарков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

Л. Т. Перевезенцев

Аналіз методів об'єднання квадратурних каналів радіолокаційних систем селекції рухомих цілей

Наведено аналіз схемних рішень об'єднання квадратурних каналів радіолокаційних систем селекції рухомих цілей згідно з критерієм «ефективність-вартість».

L. T. Perevezentsev

Analysis of methods of quadrature channels combination of Radar systems of selection of moving target indication

The analysis of circuit decisions of quadrature channels combination of Radar systems of selection of moving target indication in compliance with the «efficiency – cost» criterion is represented.