УДК 004.627: 004.921

САМИРА ЭБРАХИМИ КАХОУ, Е.С. СУЛЕМА
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

АДАПТИВНЫЙ СПОСОБ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В статті розглянуто спосіб ущільнення графічних даних з застосуванням маски, що задає одну чи декілька областей зображення, для яких вимоги до якості ущільненого зображення є підвищеними. Запропоновані способи побудови та ущільнення маски. Обговорено можливий формат подання даних.

This paper is dedicated to the method of graphical data compression with using of a mask that set up one or several image areas with heightened demands to compressed image quality. The methods of a mask creation and compression are proposed. Possible data format is discussed.

Ключові слова: сжатие изображений.

Введение

На сегодняшний день существует широкий круг применений графических данных, в которых изображения используются не в качестве иллюстрации, а сами по себе являются носителем ключевой информации. К таким областям можно отнести медицину, криминалистику, картографию, аэрокосмические исследования и др. При этом в ряде случаев важными являются мелкие детали изображения, а не все изображение целиком. Например, наиболее информативной частью фотографии человека является область лица, рентгеновского снимка сломанной конечности – область перелома, аэрофотоснимка – конкретный объект наблюдения и т.д.

Известным фактом [1,2] является то, что графические данные при преобразовании в цифровую форму требуют больших объемов памяти для хранения. На сегодняшний день разработано большое количество алгоритмов сжатия графических данных [3, 4].

Различают два вида алгоритмов сжатия: сжатие с потерями и сжатие без потерь. Алгоритмы сжатия без потерь позволяют получить в результате декомпрессии изображение, полностью идентичное оригинальному. Алгоритмы сжатия с потерями в процессе компрессии отбрасывают и/или округляют часть данных про изображение, поэтому при декомпрессии восстановить оригинальное изображение удается лишь до некоторого уровня качества, что визуально проявляется в нечеткости, расплывчатости, потере мелких деталей. С точки зрения степени сжатия более эффективными являются алгоритмы с потерями, что объясняет их широкое распространение.

Общим свойством алгоритмов сжатия можно считать то, что они выполняются над всем изображением. Однако при сжатии с потерями может наблюдаться некоторое искажение мелких деталей изображения, что в свою очередь затруднит интерпретацию ключевой графической информации. Применение же алгоритмов сжатия без потерь в большинстве случаев не позволяет достичь максимально высокую степень сжатия. Для того, чтобы сохранить высокое качество представления фрагментов изображения, представляющих повышенный интерес, и при этом обеспечить максимально высокую степень сжатия, представляется целесообразным применять алгоритмы сжатия не ко всему изображению, а к фрагментам изображения с учетом их особенностей. На сегодняшний день данная задача является актуальной и не имеет решения. Целью данного исследования является разработка способа сжатия графических данных с адаптацией к структуре изображения. Под адаптацией будем понимать процесс деления изображения на непересекающиеся фрагменты с учетом их информационной ценности или морфологической структуры с целью дальнейшего сжатия каждого из фрагментов способом, наиболее оптимальным с точки зрения соотношения двух ключевых характеристик «степень сжатия» и «уровень качества». Для решения задачи адаптации предлагается ввести понятие маски, которая показывает месторасположение одной или нескольких областей интереса.

Постановка задачи

Произвольное изображение A_a может быть рассмотрено как открытое множество, такое что:

$$\left\{ a_{ij} \in A_a \left| \begin{array}{c} 0 \le a_{ij} \le L \\ 1 \le i \le n \\ 1 \le j \le m \end{array} \right. \right\}, \quad (1)$$

где L – количество градаций оттенков цвета,
m и n задают размер изображения в точках (пикселях).

Цифровое изображение A размера $m \times n$ пикселей, полученное в результате аналого-цифрового преобразования исходного изображения A_a, может быть описано в матричном виде:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где a_{ij} – числовое значение оттенка цвета ij-пикселя.

С точки зрения информационной ценности выделим в изображении, по крайней мере, одну область G, которую назовем областью интереса. С математической точки зрения область интереса G представляет собой связное открытое множество в евклидовом пространстве, заданное своей границей.

Маской изображения A будем называть матрицу T размерности $m \times n$, причем $t_{ij} \in \{0,1\}$, где $t_{ij}=1$, если ij-пиксель принадлежит области интереса G, $t_{ij}=0$, в противном случае.

Тогда задача заключается в построении такой маски T, которая максимально точно отображает положение области интереса G на заданном изображении A. В терминах теории множеств маска T представляет собой замыкание множества G на заданном пространстве изображения A.

Способы построения маски

Способ построения маски T для заданного изображения A зависит от того, является ли область интереса G заданной или ее необходимо найти, исходя из некоторого критерия.

Пусть область интереса G задана.

Область интереса G может быть прямоугольной и произвольной формы. Если область интереса имеет прямоугольную форму, то для ее задания достаточно определить номера строки и столбца двух пикселей, a_{kl} и a_{pq}, изображения A, расположенных в противоположных углах прямоугольника области интереса G ($k< p$, $l< q$). В этом случае задача построения маски T является тривиальной, так как сводится к заполнению матрицы T, первоначально являющейся нулевой, единицами в позициях t_{ij}, где $k\leq i\leq p$, $l\leq j\leq q$.

Пусть область интереса имеет произвольную форму, то есть задана ее граница. Разделим множество точек изображения A на два подмножества: подмножество точек, которые принадлежат области интереса G и подмножество точек, которые ей не принадлежат. Такое разделение возможно, так как по условию известно месторасположение границы области интереса G относительно изображения. В этом случае необходимо заполнить матрицу T, первоначально являющуюся нулевой, единицами в позициях t_{ij}, если $a_{ij} \in G$.

Теперь рассмотрим определение области интереса, исходя из некоторого критерия. В частности рассмотрим два случая:

1) область интереса определяется, исходя из структурных особенностей изображения,

2) область интереса определяется, исходя из границ объектов, присутствующих в изображении.

В первом случае под структурными особенностями понимается неоднородность изображения с точки зрения наличия в нем так называемых областей постоянства, где все пиксели имеют одинаковый или близкий по значению оттенок цвета, и областей с большим количеством мелких деталей, где соседние пиксели существенно отличаются по цвету. Для выделения этих областей можно воспользоваться статистическими характеристиками, определяемыми по гистограмме яркости. В частности можно проводить анализ изображения на основе значения средней энтропии [1,2]:

$$e = -\sum_{i=0}^{L-1} g(b_i)\log_2 g(b_i)\,, \tag{3}$$

где L – количество градаций оттенков цвета,

$g(b_i)$ – гистограмма яркости,

b – случайная величина, соответствующая яркости элементов изображения.

Энтропия характеризует изменчивость яркости изображения: она принимает максимальное значение в случае равновероятностных значений, то есть при наличии большого количества мелких деталей, и e=0 для областей постоянства.

Тогда предлагается следующий способ получения маски.

Вычислим значение энтропии e_0 для всего изображения A. Затем разделим изображение на N непересекающихся областей A^1_i так, что:

$$\begin{cases} A_1^1 \cup A_2^1 \cup \ldots \cup A_N^1 = A \\ A_1^1 \cap A_2^1 \cap \ldots \cap A_N^1 = \varnothing \end{cases}. \tag{4}$$

Пусть, например, N=4, тогда имеем 4 квадранта матрицы изображения A.

Вычислим значение энтропии e^1_i для каждой области A^1_i и сравним полученные значения со значением энтропии e_0 для всего изображения A. Признаком наличия мелких деталей в области является увеличение значения энтропии по сравнению с энтропией всего изображения. Такую область (одну или несколько) первого уровня разделим на области A^2_i второго уровня так, что:

$$\begin{cases} A_1^2 \cup A_2^2 \cup \ldots \cup A_N^2 = A^1 \\ A_1^2 \cap A_2^2 \cap \ldots \cap A_N^2 = \varnothing \end{cases}, \tag{5}$$

и вычислим для каждой из областей второго уровня значение энтропии e^2_i. Признаком наличия мелких деталей в области второго уровня является увеличение значения энтропии по сравнению с энтропией соответствующей области первого уровня.

Указанную процедуру следует продолжать до достижения заданного уровня детализации или до достижения минимального размера области 2×2 пикселя.

Маска T, первоначально являющаяся нулевой матрицей, заполняется единицами в позициях, соответствующих пикселям изображения A, принадлежащим областям с максимальной энтропией.

Во втором случае, когда область интереса определяется, исходя из границ объектов, присутствующих в изображении, выделение границ областей изображения может быть выполнено с использованием операций морфологической обработки изображений: дилатации, эрозии, центрального отражения и параллельного переноса [2]. Рассмотрим их подробнее.

Пусть D и H – множества в пространстве Z^2, элементами которых являются координаты пикселей, представляющих объекты на изображении.

Центральное отражение множества D определяется следующим образом:

$$\hat{D} = \{d' \mid d' = -d, \quad d \in D\}. \tag{6}$$

Параллельный перенос множества H в точку $z = (z_1, z_2)$ определяется по следующему правилу:

$$(H)_z = \{h' \mid h' = h + z, \quad h \in H\}. \tag{7}$$

Дилатация множества D по множеству H определяется как

$$D \oplus H = \{z \mid (\hat{H})_z \cap D \notin \varnothing\}. \tag{8}$$

Эрозия множества D по множеству H определяется как

$$D \ominus H = \{z \mid (H)_z \subseteq D\}. \tag{9}$$

Тогда граница $\beta(D)$ множества D может быть выделена путем выполнения эрозии множества D по множеству H, а затем получения разности множества D и результата его эрозии:

$$\beta(D) = D \setminus (D \ominus H). \tag{10}$$

При этом H называют примитивом. Может быть использован примитив вида:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Тогда построение маски T заключается в заполнении матрицы T, первоначально являющейся нулевой, единицами в позициях, принадлежащим областям, которые находятся внутри найденных границ.

Задача заполнения области в пределах обнаруженной границы состоит в том, чтобы, начав с некоторой точки внутри этой границы, заполнить единичными значениями всю область. При этом предполагается, что граница является замкнутой. Если она не является замкнутой, то ее можно замкнуть, соединив крайние точки границы путем заполнения единицами позиций матрицы, находящихся между этими точками.

К заполнению области единицами приведет следующая рекуррентная процедура:

$$t_{ij} = (t_{ij-1} \oplus H) \cap D^c, \tag{12}$$

где i, j определяют позицию внутри области,
D^c – дополнение множества D,
H – примитив вида:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{13}$$

В результате выполнения указанной рекуррентной процедуры получаем маску T, заполненную единицами в позициях, соответствующих объектам на изображении A.

Способ сжатия маски

Маска T представляет собой бинарную матрицу. Для ее компактного представления с целью хранения с остальными данными об изображении необходимо сжать матрицу, т.е. представить в виде, когда для хранения маски потребуется минимальное количество байт.

Предлагается способ сжатия маски, который заключается в преобразовании матрицы T в вектор и записи его в виде последовательности десятичных чисел, каждое из которых представляет длину группы подряд стоящих одинаковых элементов в полученном бинарном векторе.

Задача сжатия маски T в этом случае заключается в преобразовании матрицы T в вектор таким образом, чтобы элементы вектора образовывали группы подряд стоящих одинаковых элементов максимально возможной длины. Поясним это на примере. Пусть дана матрица X вида:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (14)$$

Матрица X может быть преобразована в вектор разными способами, например:
1) путем последовательной записи столбцов,
2) путем последовательной записи строк,
3) путем последовательной записи элементов, расположенных в особом порядке, например, в порядке, задаваемом матрицей Z:

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 6 & 7 \\ 3 & 5 & 8 & 13 \\ 4 & 9 & 12 & 14 \\ 10 & 11 & 15 & 16 \end{bmatrix}. \qquad (15)$$

Тогда получим следующие векторы:

$$V_1 = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1],$$
$$V_2 = [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1], \qquad (16)$$
$$V_3 = [0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1].$$

Введем понятие вектора групп W как вектора, элементами которого являются количества подряд стоящих одинаковых элементов вектора V. Вектор групп W является результатом процедуры сжатия маски и хранится вместе с остальными данными про изображение.

Для приведенного примера получаем следующие векторы групп:

$$W_1 = [5\ 5\ 5\ 1],$$
$$W_2 = [2\ 1\ 2\ 2\ 2\ 1\ 3\ 1\ 1\ 1], \qquad (17)$$
$$W_3 = [4\ 2\ 1\ 2\ 1\ 1\ 4\ 1].$$

Из чего следует, что для заданной матрицы X наиболее приемлемым с точки зрения длины групп подряд стоящих одинаковых элементов является способ преобразования, при котором матрица преобразуется в вектор путем последовательной записи ее столбцов.

Обобщим этот способ на случай произвольной матрицы.

Пусть дана матрица T вида:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nm} \end{bmatrix}, \qquad (18)$$

где $t_{ij} \in \{0,1\}$.

Получим для каждой строки матрицы T вектор групп вида $R^i = [r_1^i \quad r_2^i \quad \ldots \quad r_k^i]$, где k – количество групп подряд стоящих одинаковых элементов, i – номер строки матрицы T, в соответствии со следующими условиями:

1) вектор групп всегда состоит из четного количества элементов,

2) элементы, стоящие на нечетных позициях вектора групп, означают количество элементов в группах подряд стоящих нулей,

3) если какой-либо столбец или какая-либо строка матрицы начинается с единицы, то $r_1^i = 0$,

4) элементы, стоящие на четных позициях вектора групп, означают количество элементов в группах подряд стоящих единиц,

5) если какой-либо столбец или какая-либо строка матрицы заканчивается нулем, то $r_k^i = 0$.

Далее вычисляем сумму норм полученных n векторов групп R^i:

$$S_R = \|R^1\| + \|R^2\| + \ldots + \|R^n\|. \qquad (19)$$

Аналогично получаем векторы групп $C^j = [c_1^j \quad c_2^j \quad \ldots \quad c_p^j]$, где p – количество групп подряд стоящих одинаковых элементов, j – номер столбца, для всех столбцов матрицы T. После чего вычисляем сумму норм полученных m векторов групп C^j:

$$S_C = \|C^1\| + \|C^2\| + \ldots + \|C^m\|. \qquad (20)$$

Из двух рассматриваемых способов преобразования матрицы в вектор – последовательной записью столбцов и последовательной записью строк – следует выбрать первый, если $S_R < S_C$, и второй – в противном случае.

Теперь из множества векторов групп $\{R^1, R^2,\dots R^n\}$ или $\{C^1, C^2,\dots C^m\}$ (в зависимости от результата сравнения значений S_R и S_C) необходимо получить единый вектор групп W для всей матрицы T, что и будет результатом процедуры сжатия маски T.

Пусть в результате сравнения значений S_R и S_C был выбран способ преобразования матрицы в вектор путем последовательной записи столбцов. Тогда необходимо определить порядок записи столбцов, при котором длина вектора W будет минимальной, т.е. для хранения маски потребуется минимальное количество байт, что и требуется получить.

Для этого полученные m векторов групп C^j, соответствующие столбцам матрицы T, необходимо проанализировать следующим образом:

1) если $c_p^i = 0$, а $c_1^j \neq 0$, где i и j – номера столбцов ($i \neq j$), то эти столбцы могут быть объединены в порядке $\{C^i\ C^j\}$, причем результирующий вектор групп будет иметь вид:

$$W = [c_1^i \quad c_2^i \quad \dots \quad c_{p-1}^i \quad (c_p^i + c_1^j) \quad c_2^j \quad \dots \quad c_p^j]; \tag{21}$$

2) если $c_p^i \neq 0$, а $c_1^j = 0$, где i и j – номера столбцов ($i \neq j$), то эти столбцы могут быть объединены в порядке $\{C^j\ C^i\}$, причем результирующий вектор групп будет иметь вид:

$$W = [c_1^j \quad c_2^j \quad \dots \quad c_{p-1}^j \quad (c_p^j + c_1^i) \quad c_2^i \quad \dots \quad c_p^i]. \tag{22}$$

Если существует несколько способов объединения столбцов матрицы, то предпочтение следует отдать тому способу, при котором длина вектора W будет минимальной. Наилучшим способом является объединение столбцов в порядке их вхождения в матрицу T. В этом случае порядок следования столбцов можно не хранить вместе со сжатой маской.

Аналогично выполняются действия над строками матрицы T. При этом вместе с данными про сжатую маску необходимо хранить признак (длиной 1 байт) того, были объединены строки или столбцы матрицы.

Процедура сжатия маски, выполненная в предложенном способе, является обратимой, поскольку:

1) известно, каким образом матрица T была преобразована в вектор: по строкам или по столбцам, а также известен порядок, в котором это преобразование выполнено,

2) матрица T является бинарной,

3) вектор длин групп W имеет однозначно определенную структуру (четное число элементов; элементы, стоящие на нечетных позициях, означают количество подряд стоящих нулей; элементы, стоящие на четных позициях, означают количество подряд стоящих единиц).

Формат хранения и алгоритм обработки данных

Данные про изображение, которые необходимо хранить с целью обеспечения гарантированного восстановления изображения, включают в себя такие компоненты:
1) последовательность сжатых данных,
2) последовательность несжатых данных,
3) сжатая маска и порядок ее восстановления.

Кроме того, должен быть сохранен размер изображения (для хранения требуется 4 байта), количество градаций цвета (2 байта) и признак, указывающий на то, какой алгоритм используется для сжатия данных, которые подлежат сжатию (для хранения признака достаточно 1 байта, при этом список возможных алгоритмов сжатия должен быть стандартизирован).

Объем сжатых данных $U_{compressed}$ и коэффициент сжатия зависят от способа сжатия.

Объем несжатых данных $U_{uncompressed} = m \cdot n - N_{compressed}$, где $N_{compressed}$ – количество пикселей, данные о цвете которых входят в сжимаемую последовательность.

Оценим объем данных про маску T, которые необходимо хранить для однозначного ее восстановления, и степень сжатия.

Если не производить каких-либо преобразований маски, то для ее хранения в несжатом виде необходимо $m \times n$ байт.

При сжатии маски хранению подлежат:

1) признак того, были объединены строки или столбцы матрицы – 1 байт;

2) вектор длин групп – k байт, где k представляет собой количество групп подряд стоящих одинаковых элементов и зависит от вида матрицы;

3) вектор порядка следования – $q = m$ байт, если объединены столбцы, или $q = n$ байт, если объединены строки.

Следовательно, общий объем данных про маску составляет $U_{mask} = k + q + 1$ байт, то есть сжатие в выполняется с коэффициентом, равным $\frac{m \cdot n}{k + q + 1}$.

Учитывая структуру матрицы маски, которая следует из назначения маски, можно утверждать, что $k << (m \times n)$. Это означает, что маска может быть сжата примерно в q раз.

Таким образом, объем основных данных про изображение, которые необходимо хранить, составляет:

$$U = U_{compressed} + m \cdot n - N_{compressed} + k + q + 8 \text{ байт.}$$

Тогда возможный формат хранения данных про изображение представлен в табл. 1.

Таблица 1

Структура файла

Название поля	Длина (байты)	Смещение (байты)	Описание
Заголовок файла			
Width	2	0	Ширина изображения (пиксели)
Height	2	2	Высота изображения (пиксели)
ColorLevels	2	4	Количество градаций цвета
Planes	1	6	Количество цветовых плоскостей (зарезервировано)
CompressionType	1	7	Тип алгоритма сжатия
CompresDataOffset	4	8	Смещение сжатых данных от начала файла
UncompresDataOffset	4	12	Смещение несжатых данных от начала файла
MaskMethod	1	16	Признак способа преобразования маски
LenghtsOffset	4	17	Смещение вектора длин групп от начала файла
OrderOffset	4	21	Смещение вектора порядка от начала файла
Данные			
CompresData	$U_{compressed}$	25	Последовательность сжатых данных
UncompresData	$U_{uncompressed}$	$25 + U_{compressed}$	Последовательность несжатых данных
Lenghts	k	$25 + U_{compressed} + U_{uncompressed}$	Вектор длин групп
Order	q	$25 + U_{compressed} + U_{uncompressed} + k$	Вектор порядка

Исходными данными для алгоритма обработки данных про изображение являются:

1) изображение,
2) маска или критерий ее получения,
3) алгоритм сжатия или критерий его выбора.

Алгоритм обработки данных сводится к следующим основным действиям:

1) определение маски,
2) разделение массива данных про изображение на два потока: поток сжимаемых данных и поток данных без сжатия,
3) сжатие потока сжимаемых данных заданным или выбранным по определенным критериям алгоритмом,
4) сжатие маски,
5) запись данных в файл описанного выше формата.

Процесс восстановления данных производится в обратном порядке.

Выводы

Предлагаемый адаптивный способ сжатия позволяет сохранить высокую точность информации об области повышенного интереса на изображении и при этом обеспечить компактное представление графических данных в виде файла. Данный способ сжатия изображений рассматривается авторами не как альтернатива существующим способам и алгоритмам сжатия изображений, а как дополнение к ним, поскольку в качестве алгоритма сжатия последовательности сжимаемых данных может быть выбран любой из существующих алгоритмов сжатия, как с потерями, так и без потерь.

Дальнейшая работа над предложенным способом и алгоритмом будет заключаться в выработке рекомендаций по выбору алгоритма сжатия, оптимального с точки зрения степени сжатия, исходя из морфологических особенностей изображения.

Литература

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Кн. 1: – М.: Мир, 1982. – 312 с.: ил.

2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. / Под ред. Чочиа П.А. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

3. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.

4. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии. – М.: Триумф, 2003. – 336 с.: ил.

Надійшла 8.2.2010 р.

УДК 621.396.6

О.В. ВОЙЦЕХОВСЬКА, О.О. ЛАЗАРЄВ, Л.Б. ЛІЩИНСЬКА
Вінницький національний технічний університет

ПОМНОЖУВАЧ ІНДУКТИВНОСТІ НА L-НЕГАТРОНІ

В статті представлено математичну модель помножувача індуктивності на L-негатроні та надано результати комп'ютерного моделювання схеми помножувача індуктивності на базі схемотехнічного аналога L-негатрона.

In the article the mathematical model of inductance multiplier on a L-negatron is presented and the computer design results of descriptions of inductance multiplier based on analog circuitry of L-negatron are shown.

Ключові слова: помножувач індуктивності, L-негатрон, коефіцієнт помноження індуктивності.

Вступ

Подальший розвиток сучасної мікроелектроніки пов'язаний зі збільшенням функціональних можливостей електронних пристроїв інформаційно-вимірювальних систем. Підвищення надійності та технічних характеристик таких пристроїв досягається за рахунок виготовлення в одному технологічному циклі окремих радіоелектронних блоків, що працюють в широкому частотному та температурному діапазонах. Це, в свою чергу, викликає проблему реалізації інтегральної індуктивності, яка входить до складу таких важливих елементів кіл, як коливальні контури автогенераторів, фільтрів, кіл корекції частотних елементів і т.д. Проблема вирішується шляхом використання плівкових індуктивностей і гіраторів. Величини індуктивності та добротності в тонкоплівкових котушках індуктивності пропорційно залежать від геометричних розмірів, що обмежує можливість мініатюризації пристроїв, а гіраторні індуктивності мають обмежений частотний діапазон, велике споживання енергії, необхідність використання великої кількості транзисторів, що знижує їх стабільність. Вирішити дані проблеми можливо шляхом використання помножувачів індуктивності.

Постановка задачі дослідження

Існує декілька варіантів реалізації індуктивності.

По-перше, це напівпровідникові аналоги реактивностей, які виготовляються за технологією інтегральних мікросхем та мають малі габарити, низьку вартість та підвищену надійність [1]. Напівпровідникові аналоги індуктивності виконують функцію дротяної індуктивності, але, на відміну від неї не запасають магнітної енергії та не піддаються впливу магнітних полів від інших джерел енергії. Крім того, аналоги індуктивності мають більшу добротність на високих частотах. В таких аналогах індуктивності в якості активного елементу використовуються операційні підсилювачі (мають високу температурну стабільність але обмежений частотний діапазон), та транзистори (мають більш ширший частотний діапазон). Крім того, існують аналоги індуктивності на основі пристроїв з від'ємним диференціальним опором, які характеризуються простотою та малою кількістю елементів, а деякі з них дозволяють отримати параметри, не завжди досяжні при використанні традиційних методів побудови (еквіваленти *p-n-p-n*-структури) [2, 3].

По-друге, це застосування помножувача індуктивності на конверторі імітансу, узагальнену схему якого показано на рис. 1а. Помножувач індуктивності – активний чотириполюсник, величина індуктивності між однією з пар клем якого пропорційно залежить від величини індуктивності, підключеної до іншої пари клем.

До основних параметрів такого помножувача індуктивність відносяться:

1. Коефіцієнт множення індуктивності $K_L = \dfrac{L_2}{L_1}$, де L_1 – величина помножуваної індуктивності, L_2 – величина помноженої індуктивності.

2. Мінімальна частота $f_{y\min}$ та максимальна частота $f_{y\max}$ помноження індуктивності, де $K_L(f_{y\min}) = 1$, $K_L(f_{y\max}) = 1$.

3. Абсолютна смуга частот помноження індуктивності $\Delta f_y = f_{y\max} - f_{y\min}$.

4. Коефіцієнт помноження добротності $K_Q = \dfrac{Q_2}{Q_1}$, де Q_1 – добротність котушки індуктивності, що