

УДК 621.396.97

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ МАСКИРОВКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Стефанов М.А.

Поволжский Государственный Университет Телекоммуникаций и Информатики, г. Самара
E-mail: Stefanov-m@yandex.ru

Аннотация. Описывается метод вычисления вероятности маскировки спектральных компонент звукового сигнала, который необходим в исследованиях по повышению эффективности сжатия звуковых сигналов с использованием психоакустических свойств слухового анализатора человека.

Ключевые слова: звуковой сигнал, спектр, спектральные компоненты, сжатие звукового сигнала, алгоритм сжатия, слуховой анализатор, психоакустические свойства.

Постановка задачи

В современных телекоммуникационных технологиях компрессия цифровых аудиоданных осуществляется путем ограничения разрядности коэффициентов частотных дискретных ортогональных преобразований (ДОП). При этом необходимая степень ограничения определяется эмпирически. Вместе с тем известен подход [1], позволяющий теоретически оценить ее распределение в пределах интервала преобразования. Заключается он в интерпретации операции округления или усечения k -го коэффициента ($K_x(k)$) ДОП как прямоугольной амплитудной модуляции полосного шума с центральной частотой f_k . При этом в качестве критерия используется коэффициент минимально ощущаемой на слух прямоугольной амплитудной модуляции шума m_k .

Как известно [2], величина m_k зависит от двух параметров: частоты модуляции и ширины полосы шума $DF_{ш, k}$. Первый параметр определен в работе [3] на основе модели звуковых сигналов А.В. Римского-Корсакова. При оценке же второго параметра необходимо учитывать [4] не только частотные свойства используемого ДОП, но и связь свойства порогового восприятия слухом изменения интенсивности спектральных компонент с эффектом маскировки слухового анализатора.

Таким образом, один из основных вопросов в задаче оценки распределения допустимой степени ограничения разрядности коэффициентов ДОП в пределах интервала преобразования заключается в оценке соответствующего распределения вероятности маскировки.

Решение

Эффект маскировки слухового анализатора исследован достаточно полно [2]. На рис.1

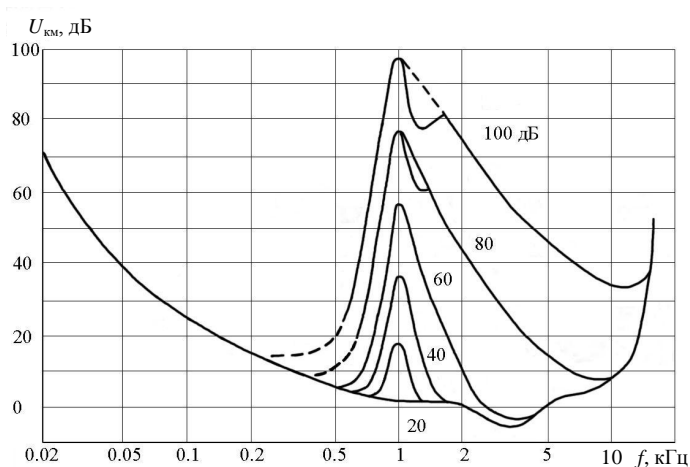


Рис. 1. Кривые порога слышимости тона при маскировке полосным шумом

приведены кривые порога слышимости при маскировке полосным шумом. Известно также их аналитическое описание [5]. Однако оно обладает рядом недостатков:

- левая ветвь и первый участок правой ветви приняты симметричными, хотя по рис. 1 видно, что левая ветвь значительно круче;

- крутизна второго участка правой ветви и его положение относительно пика кривой маскировки (КМ) считаются постоянными. Однако (см. рис. 1) с увеличением уровня тона крутизна этого участка увеличивается и, кроме того, по

уровню он смещается вниз;

– при уровне тона не более 60 дБ правая ветвь отождествляется с первым участком, хотя по результатам экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что она ближе к комбинации первого и третьего участков.

С целью учета этих особенностей КМ автором предлагаются следующие более простые и вместе с тем достаточно адекватные соответствующим участкам КМ выражения:

$$U_{\text{КМ},i}^{(1)} = -54 \cdot |fo_{k,i}|^{1,6} + U_i + a_{m,i}, \quad (1)$$

$$U_{\text{КМ},i}^{(1)} = -18 \cdot |fo_{k,i}|^{1,6} + U_i + a_{m,i}, \quad (2)$$

$$U_{\text{КМ},i}^{(2)} = -3 \cdot fo_{k,i} + (0,05 \cdot fo_{k,i} + 0,76) \cdot U_i + a_{m,i}, \quad (3)$$

$$U_{\text{КМ},i}^{(3)} = -\alpha_1 \cdot \lg(1 + \alpha_2 \cdot fo_{k,i} \cdot e^{-\alpha_3 \cdot U_i}) + U_i + a_{m,i}, \quad (4)$$

где индекс в скобках указывает участок КМ («л» – левая ветвь, «1» – первый участок правой ветви и т.д.) маскирующей i -й спектральной компоненты уровнем U_i ;

относительная частота

$$fo_{k,i} = (f_k - f_i) / \Delta F_i \quad (5)$$

и f_k – частота возможно маскируемого коэффициента ДОП $K_x(k)$, f_i – частота возможно маскирующего $K_x(i)$, а ΔF_i – ширина частотной группы (области волосковых клеток, возбуждаемых минимально слышимым тоном);

$a_{m,i}$ – коэффициент маскировки (определяет уровень пика КМ относительно уровня маскирующего тона или шума);

коэффициенты $\alpha_1 - \alpha_3$ управляют крутизной третьего участка КМ и определяются эмпирически.

На рис. 2 приведены КМ, рассчитанные в соответствии с (2) – (4) при наилучшем эмпирическом подборе $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и для уровней маскирующего шума 60, 80 и 100 дБ. Видно хорошее согласование по форме теоретических и экспериментальных кривых (на рисунке показаны точками). Кроме того, при уровне 60 дБ отчетливо виден переход первого участка КМ в третий. При уровне 56 дБ все три кривые, образующие соответствующие участки КМ, пересекаются в одной точке, которую назовем критической точкой. Этой точке соответствует критическая частота $fo_{\text{кр}}$. С дальнейшим уменьшением уровня остаются только первый и третий участки, а после уровня 33 дБ – один первый.

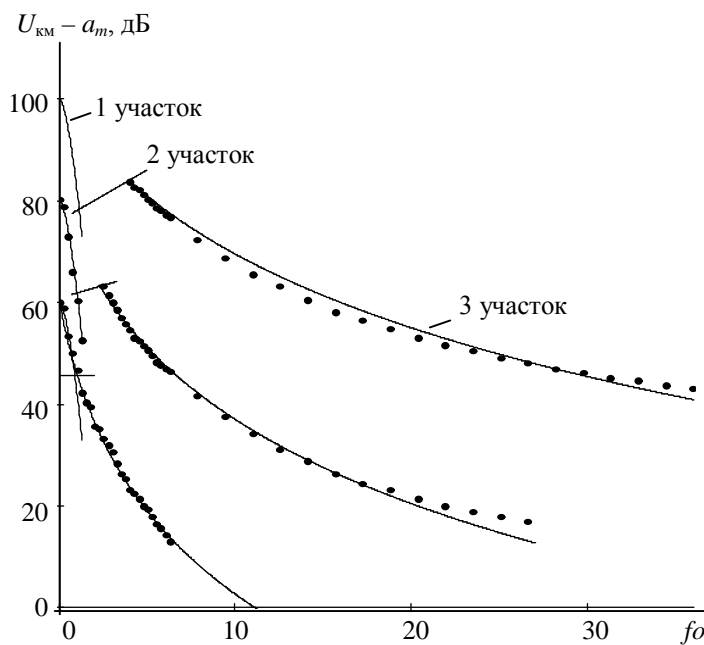


Рис. 2. Аппроксимация правой ветви кривой маскировки

Последовательность маскирующих участков правой ветви КМ $K_x(i)$ (в дальнейшем просто КМ_i) в зависимости от его уровня U_i схематично показана на рис. 3. Видно, что если $fo_{k,i} \leq fo_{\text{кр}}$ маскировка возможна только первым участком КМ_i . Если $fo_{\text{кр}} < fo_{k,i} \leq fo_1$ маскирующим является сначала первый участок, затем второй, третий и, наконец, снова первый. Если $fo_1 < fo_{k,i} \leq fo_2$ маскирующим является сначала второй, затем третий и, наконец, первый. Если же $fo_{k,i} > fo_2$ маскировка возможна только третьим участком.

Из этих условий сразу следует логика идентификации последовательности участков КМ_i при маскировке на частоте $fo_{k,i}$ (рис. 4). Если

динатами $U_{\text{км}}^{(x)}, U_i$ (рис. 5,а), где $U_{\text{км,гр1}}^{(x)}$ и $U_{\text{км,гр2}}^{(x)}$ – соответственно, нижняя и верхняя граница области существования участка x КМ_i . Приведем эту область к началу координат и преобразуем к области единичной площади путем замены переменной $U_i = z \cdot (U_{i,\text{гр2}} - U_{i,\text{гр1}}) + U_{i,\text{гр1}}$ и смещения функции $U_{\text{км}}^{(x)}(U_i)$ с последующим масштабированием:

$$f(z) = \frac{U_{\text{км}}^{(x)}[z \cdot (U_{i,\text{гр2}} - U_{i,\text{гр1}}) + U_{i,\text{гр1}}] - U_{\text{км}}^{(x)}(U_{i,\text{гр1}})}{U_{\text{км}}^{(x)}(U_{i,\text{гр2}}) - U_{\text{км}}^{(x)}(U_{i,\text{гр1}})}, \quad z \in [0, 1]. \quad (9)$$

В результате получаем так называемый квадрат вероятностей (рис. 5, б), откуда

$$P\{U_k < U_{\text{км}}^{(x)}(fo_{k,i}, U_i)\} = \int_0^1 f(z) dz. \quad (10)$$

В соответствии с (9) для второго участка КМ_i $f(z) = z$ и, как получается из (10), искомая вероятность равна 0,5.

Для третьего участка, опуская в (4) смещение U_i , согласно (9) и (10)

$$P\{U_k < U_{\text{км}}^{(3)}(fo_{k,i}, U_i)\} = g1 + g2, \quad (11)$$

где

$$g1 = \frac{-1}{\beta} \int_0^1 \ln \{ \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{гр1}}) + \alpha_2 \cdot fo_{k,i} \cdot \exp(-\alpha_3 \cdot [z \cdot (U_{i,\text{гр2}} - U_{i,\text{гр1}})]) \} dz, \quad (12)$$

$$g2 = \frac{\ln [\alpha_2 + \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{гр1}})]}{\beta} \quad (13)$$

и

$$\beta = -\ln \{1 + \alpha_2 \cdot fo_{k,i} \cdot \exp(-\alpha_3 \cdot U_{i,\text{гр2}})\} + \ln \{1 + \alpha_2 \cdot fo_{k,i} \cdot \exp(-\alpha_3 \cdot U_{i,\text{гр1}})\}. \quad (14)$$

С целью вычисления $g1$ воспользуемся методом подстановки:

$$x = \exp \left\{ -\alpha_3 \cdot [z \cdot (U_{i,\text{гр2}} - U_{i,\text{гр1}})] \right\}.$$

Дифференцируя обе части равенства, получаем: $dx = -\alpha_3 \cdot (U_{i,\text{гр2}} - U_{i,\text{гр1}}) \cdot x \cdot dz$, откуда $dz = dx / [-\alpha_3 \cdot (U_{i,\text{гр2}} - U_{i,\text{гр1}}) \cdot x]$. При этом область значений x ограничена снизу величиной $x_1 = 1$, а сверху $x_2 = \exp[-\alpha_3 \cdot (U_{i,\text{гр2}} - U_{i,\text{гр1}})]$. В результате приходим к табличному интегралу [7]:

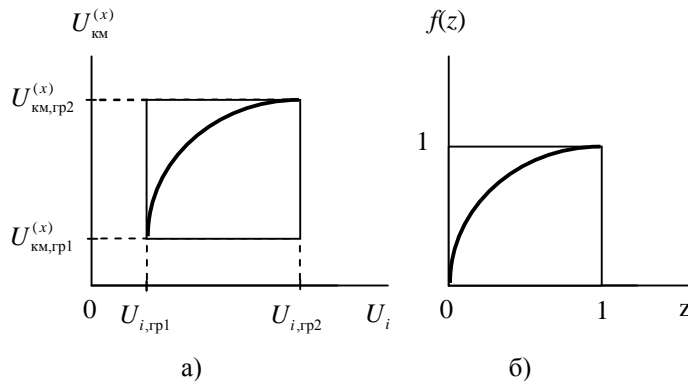


Рис. 5. Преобразование области существования участка x КМ_i на частоте $fo_{k,i}$ к квадрату вероятностей

$$\int \frac{\ln(ax+b)}{x} dx = \begin{cases} \frac{\ln^2 |ax|}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \left(\frac{b}{ax}\right)^n, & |ax| > |b|; \\ \frac{ax}{b} \cdot \ln |b|, & |ax| = |b|; \\ \ln |b| \cdot |\ln(x)| + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cdot \left(\frac{ax}{b}\right)^n, & |ax| < |b|, \end{cases}$$

и после подстановки пределов интегрирования окончательно получаем:

$$P\{U_k < U_{\text{KM}}^{(3)}(fo_{k,i}, U_i)\} = \frac{\ln[\alpha_2 + \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{rp1}})]}{\beta} + \frac{1}{\beta \cdot \alpha_3 \cdot (U_{i,\text{rp2}} - U_{i,\text{rp1}})} \times$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{-\alpha_3 \cdot (U_{i,\text{rp2}} - U_{i,\text{rp1}}) \cdot [2 \cdot \ln(\alpha_2) - \alpha_3 \cdot (U_{i,\text{rp2}} - U_{i,\text{rp1}})]}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{rp2}} \cdot n)}{n^2 \cdot \alpha_2^n} - \\ & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{rp1}} \cdot n)}{n^2 \cdot \alpha_2^n}, U_{i,\text{rp2}} < \frac{\ln(\alpha_2)}{\alpha_3}; \\ & \alpha_3^2 \cdot U_{i,\text{rp1}} \cdot (U_{i,\text{rp2}} - U_{i,\text{rp1}}) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot \alpha_2^n}{n^2 \cdot \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{rp2}} \cdot n)} - \\ & - \left\{ \begin{aligned} & \frac{\ln^2(\alpha_2) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{rp1}} \cdot n)}{n^2 \cdot \alpha_2^n}, U_{i,\text{rp1}} < \frac{\ln(\alpha_2)}{\alpha_3}; \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot \alpha_2^n}{n^2 \cdot \exp(\alpha_3 \cdot U_{i,\text{rp2}} \cdot n)}, U_{i,\text{rp1}} > \frac{\ln(\alpha_2)}{\alpha_3}; \end{aligned} \right\}; U_{i,\text{rp2}} > \frac{\ln(\alpha_2)}{\alpha_3}. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Заметим, что степенные ряды в (15) можно заменить конечными суммами, поскольку, как показывают расчеты, уже при $n = 20$ они практически сходятся.

До сих пор предполагалось, что если $K_x(k)$ маскируется, то только отдельно взятым $K_x(i)$. Однако в пределах спектральной выборки существует не один коэффициент ДОП, способный маскировать $K_x(k)$, то есть удовлетворяющий условию:

$$U_{\text{KM}}^{(3)}(fo_{k,i}, D_i) > A(f_k). \quad (16)$$

С учетом этого обстоятельства маскировка $K_x(k)$ со стороны $K_x(i)$ может состояться, если $K_x(i)$ не маскируется и KM_i непрерывна, по крайней мере, вплоть до частоты f_k . Отсюда искомая вероятность должна определяться как

$$G_k = P\{U_k < A(f_k)\} + P\{U_k \geq A(f_k)\} \cdot \sum_{i=n_1}^{n_2} G_{k,i} P(A), \quad (17)$$

где $P\{U_k < A(f_k)\}$ – вероятность маскировки $K_x(k)$ абсолютным порогом слышимости; n_1 и n_2 – соответственно верхняя и нижняя границы области коэффициентов ДОП, удовлетворяющих (16); $P(A)$ – вероятность события существования KM_i на частоте $fo_{k,i}$, то есть когда $K_x(i)$ не маскируется и KM_i непрерывна, по крайней мере, вплоть до частоты f_k .

Вычисление $P(A)$ является довольно непростой задачей. Значительно проще вычислить G_k через вероятность отсутствия маскировки $P_{k,i}$. Действительно, если KM_i существует на частоте $fo_{k,i}$, $K_x(k)$ не маскируется с вероятностью $1 - G_{k,i}$, в противном случае (событие $P(\bar{A})$) не маскируется с вероятностью 1. Таким образом, поскольку события существования KM_i на частоте $fo_{k,i}$ (событие A) и маскировки $K_x(k)$ независимы, $P_{k,i} = (1 - G_{k,i}) \cdot P(A) + P(\bar{A}) = (1 - G_{k,i}) \cdot [1 - P(\bar{A})] + P(\bar{A})$, откуда $P_{k,i} = 1 - G_{k,i} + P(\bar{A}) \cdot G_{k,i}$. Учитывая, что события маски-

ровки $K_x(i)$ и отсутствия КМ_{*i*} на частоте $f_{0,k,i}$ несовместны, $P_{k,i} = 1 - G_{k,i}$. Полученный результат означает, что $P_{k,i}$ в отличие от $G_{k,i}$ можно вычислять для потенциально возможной КМ_{*i*}, что является достаточным условием отсутствия маскировки: $K_x(k)$ не маскируется, если его уровень не меньше уровня КМ любого другого $K_x(i)$. В соответствии с этим и полагая коэффициенты ДОП независимыми, выражение (17) переписывается в виде:

$$G_k = 1 - P\{U_k \geq A(f_k)\} \cdot \prod_{i=n_1}^{n_2} (1 - G_{k,i}).$$

На основании результатов, полученных в данном подразделе, предлагается следующий метод оценки вероятности G_k , обобщенный алгоритм которого представлен на рис. 6.

Вход метода (блок 1): длина выборки $N' = N/2$ для ДПФ-Х и $N' = N$ для ДКП, динамический диапазон D изменения сигнала, нижняя $F1$ и верхняя $F2$ границы рабочего диапазона частот, критическая относительная частота $f_{0кр}$ и частота дискретизации F_d .

На первом шаге (блок 2) вычисляются вторичные исходные данные:

- разрешающая способность ДОП по частоте $\Delta f = F2/N'$;
- номер r первого коэффициента, удовлетворяющего условию $f_r > F1$. С увеличением частоты дискретизации относительно ее стандартного (общепринятого для данного рабочего диапазона частот) значения частотное расстояние Δf может оказаться меньше $F1$. В этом случае коэффициенты с номерами меньшими r игнорируются;

- динамический диапазон $D_k = D$ если $D \leq B(f_k)$ и $D_k = B(f_k)$ в противном случае, где:

$$B(f_k) = \frac{-36}{\lg(f_k)} - 1,2 \cdot \lg(f_k) + 227 \cdot 2^{-f_k \cdot 10^{-5}} - 75, \text{ дБ};$$

- абсолютный порог слышимости [4]: $A(f_k) = 660/f_k - 18 \cdot \lg(f_k) + 21,7 \cdot e^{6 \cdot f_k \cdot 10^{-5}} + 26, \text{ дБ};$

- коэффициент маскировки [4]: $a_{m,k} = 5 \cdot e^{-2,2 \cdot f_k \cdot 10^{-4}} - 6, \text{ дБ};$

- ширина частотной группы [4]: $\Delta F_k = 10^{-5,4} \cdot f_k^2 + 0,076 \cdot f_k + 58, \text{ Гц};$

- вероятность $P\{U_k \geq A_k\} = 1 - \text{dec}(A_k/20) / \text{dec}(D_k/20)$.

Далее для каждого $k \in [r, N' - 1]$ (блок 3) в соответствии с (18) вычисляется вероятность отсутствия маскировки $K_x(k)$ со стороны $K_x(i)$, расположенных справа от $K_x(k)$ ($i \in [k + 1, n_2]$) (блок 4), затем (блок 6) – слева ($i \in [n_1, k - 1]$) и, наконец, полная вероятность маскировки $K_x(k)$ (блок 7).

На выходе (блок 5) метод дает вектор вероятностей маскировки G_k ($k \in [r, N' - 1]$).

Детальный алгоритм вычисления вероятности P_1 (блок 4 рис. 6) приведен на рис. 7.

Для заданного k задается номер первого возможно маскирующего коэффициента и начальное значение вероятности отсутствия маскировки $K_x(k)$ (блок 8). Затем для каждого $K_x(i)$ с учетом (1) и (5) сначала проверяется существование возможности маскировки (блок 10):

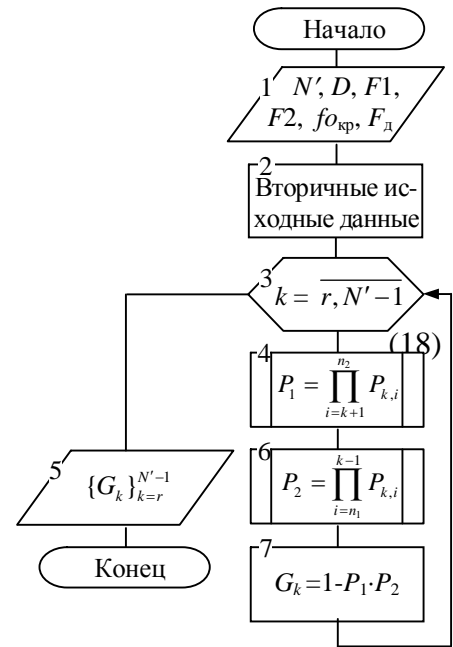


Рис. 6. Метод оценки G_k

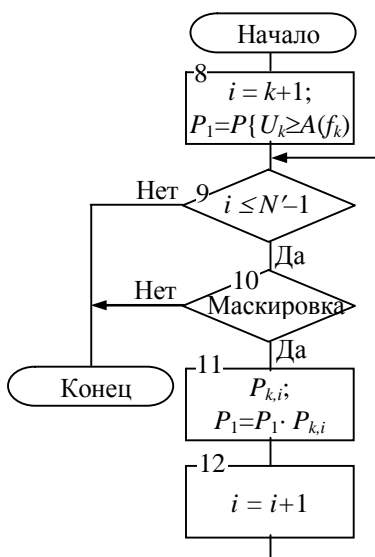
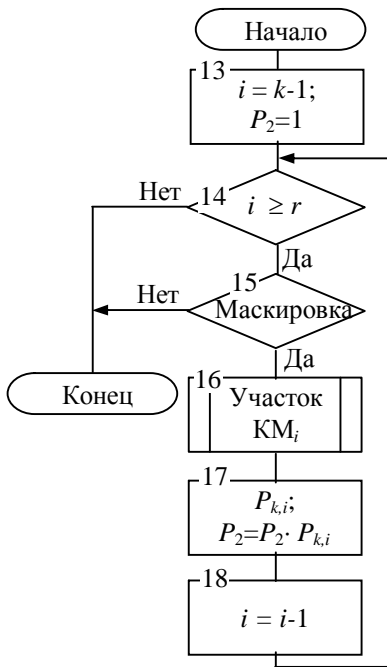


Рис. 7. Вычисление P_1

Рис. 8. Вычисление P_2

$$U_{\text{км}}^{(n)}(fo_{k,i}, D_i) > A(f_k). \quad (19)$$

Далее (блок 11) определяются границы области маскировки: $U_{i,\text{гр}2} = D_i$, $U_{\text{км},\text{гр}2} = U_{\text{км},i}^{(n)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}2})$, $U_{i,\text{гр}1}$ находится из уравнения $U_{\text{км},i}^{(n)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1}) = A(f_k)$, а $U_{\text{км},\text{гр}1} = A(f_k)$, и в соответствии с (7) и (8) вычисляется вероятность $P_{k,i} = 1 - G_{k,i}$ и промежуточное значение вероятности P_1 . После этого производится переход к следующему $K_x(i)$ (блок 12). Процедура вычисления P_1 завершается либо при нарушении условия (19) (блок 10), либо при выходе из рабочего диапазона частот (блок 9).

Детальная алгоритмическая схема вычисления вероятности P_2 (блок 6 рис. 6) приведена на рис. 8.

Для заданного k задается номер первого возможно маскирующего коэффициента и начальное значение вероятности отсутствия маскировки $K_x(k)$ (блок 13). Для каждого $K_x(i)$ с учетом (4) и (5) проверяется существование возможности маскировки (блок 15) – условие (16). Далее (блок 16) в соответствии с рис. 3 проводится идентификация маскирующего участка КМ_i и вычисляются границы соответствующей области маскировки.

Например, для последовательности участков 1-2-3-1 эти границы определяются следующим образом:

– для первого участка $U_{i,\text{гр}2} = D_i$, $U_{\text{км},\text{гр}2} = U_{\text{км},i}^{(1)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}2})$, $U_{i,\text{гр}1}$ находится из уравнения $U_{\text{км},i}^{(1)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1}) = U_{\text{км},i}^{(2)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1})$, а $U_{\text{км},\text{гр}1} = U_{\text{км},i}^{(1)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1})$;

– для второго участка верхние границы соответствуют нижним границам предыдущего участка, $U_{i,\text{гр}1}$ находится из уравнения $U_{\text{км},i}^{(2)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1}) = U_{\text{км},i}^{(3)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1})$, а $U_{\text{км},\text{гр}1} = U_{\text{км},i}^{(3)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1})$;

– верхние границы третьего участка соответствуют нижним границам предыдущего участка, $U_{i,\text{гр}1}$ находится из уравнения $U_{\text{км},i}^{(3)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1}) = U_{\text{км},i}^{(1)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1})$, а $U_{\text{км},\text{гр}1} = U_{\text{км},i}^{(3)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1})$;

– для последнего участка верхние границы соответствуют нижним границам предыдущего участка, $U_{i,\text{гр}1}$ находится из уравнения $U_{\text{км},i}^{(1)}(fo_{k,i}, U_{i,\text{гр}1}) = A(f_k)$, а $U_{\text{км},\text{гр}1} = A(f_k)$.

Затем (блок 17) с учетом (15) вычисляется безусловная вероятность маскировки данным участком КМ_i , в соответствии с (7) и (8) вычисляется вероятность $P_{k,i} = 1 - G_{k,i}$ и промежуточное значение вероятности P_2 . После этого производится переход к следующему $K_x(i)$ (блок 18). Процедура вычисления P_2 завершается либо при нарушении условия (16) (блок 15), либо при выходе из рабочего диапазона частот (блок 14).

Выводы

Получено аналитическое выражение для оценки вероятности маскировки коэффициентов ДОП и предложен метод оценки ее распределения в пределах интервала преобразования. Эти результаты могут быть использованы в задачах оценки эффективности сжатия звуковых сигналов с прореживанием спектра.

Список используемой литературы

1. Стефанов, А.М. Применение порогового восприятия слухом интенсивности звука в сжатии звуковых сигналов / А.М. Стефанов, И.А. Стефанова. // X Российская науч. конф.: тез. докладов. – Самара, 2003. – С. 141
2. Цвикер, Э. Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации / Э. Цвикер, Р. Фельд-

келлер; пер. с нем. под ред. Б.Г. Белкина. – М.: Связь, 1971. – 69 с.

3. Стефанова, И.А. Оптимизация временного параметра эффективности сжатия звуковых сигналов / И.А. Стефанова, М.А. Стефанов. // 6 Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций»: сб. докладов. – Уфа, 2005. – С. 38–40.

4. Стефанов, М.А. Оценка ширины полосы концентрации энергии коэффициентами ДОП / М.А. Стефанов. // IX Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций»: материалы конференции. – Казань, 2008. – С. 140–141.

5. Стефанова, И.А. Аппроксимация основных характеристик слухового анализатора / И.А. Стефанова // Акустический журнал. – 2003. – т.49. – № 2. – с. 245–249.

6. Стефанова, И.А. К оценке вероятности маскировки спектральных компонент звуковых сигналов / И.А. Стефанова, А.М. Стефанов // XVI Российская науч. конф.: материалы конференции. – Самара, 2009. – Ч. 2. – С. 8

7. Прудников, А. П. Интегралы и ряды / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 800 с.