

В. А. КОЛБАСИН

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ НАБОРА НОМЕРА В ТОНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

У статті розглянутий удосконалений метод розпізнавання сигналів набору номера у тональному режимі, стійкий до наявності полігармонійної перешкоди. При малому рівні перешкоди метод припускає уточнення параметрів сигнальних компонентів (СК), а при великому рівні – посилення вимог до параметрів СК. Запропоновано метод якісного визначення рівня перешкоди по даним декількох підряд, що йдуть вікон, аналізу. Наведено структурну схему декодера, побудованого на основі запропонованого підходу.

В статье рассмотрен усовершенствованный метод распознавания сигналов набора номера в тональном режиме, устойчивый к наличию полигармонической помехи. При малом уровне помехи метод предполагает уточнение параметров сигнальных компонент (СК), а при большом уровне – усиление требований к параметрам СК. Предложен метод качественного определения уровня помехи по данным нескольких подряд идущих окон анализа. Представлена структурная работы декодера, построенного на основе предложенного подхода.

In the article improved DTMF recognition method that robust to polyharmonic interference is proposed. If interference level is low, the signal component (SC) parameters are adjusted, but if interference level is high – SC constraints are strengthened. The method for qualitative interference level estimation on several analysis windows is proposed. Flow diagram of decoder that based on proposed method is presented.

Введение. При разработке систем компьютерной телефонии важной является задача распознавания сигналов набора номера в тональном режиме (ННТР). Сигнал ННТР представляет собой сумму двух синусоидальных сигналов (сигнальных компонент, СК), частоты которых f_1, f_2 выбираются из множества допустимых частот F . Частота f_1 выбирается из набора частот нижней группы 697, 770, 852, 941 Гц, а частота f_2 - из набора частот верхней группы 1209, 1336, 1477, 1633 Гц. Выбор конкретных значений частот f_1, f_2 определяет цифру номера. Параметры сигнала задаются стандартом [1].

В большинстве приложений применяется классическая методика распознавания сигнала, одна из лучших реализаций которой приведена в работе [2]. Согласно ей на анализируемом участке сигнала вычисляются оценки спектральной плотности мощности (СПМ) на всех частотах множества F . Затем находятся две частоты, на которых были получены максимальные оценки СПМ, и из предположения, что они являются частотами СК, выполняется проверка соответствия параметров сигнала требованиям стандарта. Однако, проверка допустимости отклонения частоты СК от номинала выполняется косвенно, за счет выбора ширины элемента разрешения по частоте при оценивании СПМ, и совместно с проверкой

допустимости отношения мощностей СК (уровня твиста). Поскольку стандарт задает отдельные требования для каждого из вышеперечисленных параметров, при их совместном отклонении от номинальных значений использование значения твиста для определения соответствия сигнала требованиям стандарта будет некорректным и может привести как к ложному определению, так и к ложному пропуску цифры. К тому же, классическая методика не содержит механизмов уменьшения влияния помех, особенно полигармонических. Поскольку значительное отклонение частот СК от номинала и высокий уровень помех характерны для значительной части отечественных телефонных сетей, построение декодера, учитывающего особенности распознавания сигнала ННТР в приведенных выше случаях представляется актуальным.

Таким образом, целью данной работы является построение методики распознавания сигнала ННТР, способной работать при значительном отклонении частот СК от номинала и в присутствии достаточно мощной (в том числе и полигармонической) помехи.

Идея метода. Из-за существенных ограничений на объем используемых вычислительных ресурсов распознавание сигналов ННТР при одновременном наличии мощной помехи и существенном отклонении параметров СК от номинала представляется невозможным. Но, при наличии мощной помехи в области частот СК существенно увеличивается вероятность ложного обнаружения цифры и защита декодера от ложных срабатываний становится более важной, чем обеспечение распознавания сигнала, параметры СК которого существенно отличаются от номинала. Поэтому, в зависимости от мощности помехи приоритетным будет либо обеспечение распознавания сигналов ННТР с отклонением частоты от номинала, либо защита декодера от ложных срабатываний. Соответственно, декодер будет работать в одном из трех режимов:

1) если мощность помехи мала, то используется методика [3] оценки отклонения частоты СК от номинала и коррекции оценки СПМ СК по двум оценкам СПМ, вычисленным при различной ширине элемента разрешения по частоте (бина);

2) если мощность помехи средняя, то оценки параметров СК рассматриваются «как есть», без коррекции.

3) если мощность помехи велика, то выполняется уточнение оценок СПМ на частотах предполагаемых СК с меньшей шириной бина. Оценки СПМ на частотах, не являющихся частотами СК при этом не уточняются, чтобы искусственно не уменьшать соотношение сигнал/шум в диапазоне частот СК.

Для реализации данного подхода необходимо качественно оценить мощность помехи и отнести ее к одному из трех описанных выше классов.

Поскольку речевая помеха и сигнал ННТР занимают одну и ту же полосу частот, и разрешения по частоте обычно не хватает для разделения гармоник сигнала и помехи, достоверно оценка мощности помехи по данным одного

окна анализа в общем случае будет не достаточно надежной. С достаточной долей уверенности о наличии помехи может говорить лишь резкое уменьшение оценки мощности СК при уменьшении ширины бина.

Для оценки уровня помехи можно воспользоваться тем фактом, что энергия речевой помехи и сигнала ННТР по разному изменяется с течением времени. Энергия речевого сигнала изменяется плавно, без явно выраженных фронтов. Для сигнала ННТР, напротив, характерно резкое изменение энергии сигнала в моменты начала и завершения тональной посылки. Тогда по отношению оценок энергии сигнала, сосредоточенной в полосе ННТР, в двух последовательных окнах можно будет приблизительно определить уровень и тип помехи. Оценку энергии сигнала, сосредоточенной в области частот ННТР, предлагается находить как сумму оценок СПМ на частотах СК при ширине бина, достаточной для перекрытия бинов соседних частот на уровне 0,5. При такой ширине бина гармоника помехи будет учтена в оценках СПМ на частотах группы, куда бы она ни попала: либо в тот же бин, что и СК, либо в бин другой частоты.

Выбор длин окон анализа. При выборе длины окна анализа необходимо удовлетворить двум противоречивым требованиям. С одной стороны длина окна анализа должна обеспечивать ширину бина близкую к 7% от номинальной частоты СК. А с другой стороны для надежного распознавания сигнала ННТР необходимо чтобы как минимум два подряд идущих окна анализа были заполнены сигналом ННТР минимальной длины (40 мс) целиком при любом взаимном расположении окон анализа на сигнале. Поскольку сигнал ННТР как правило непрерывен, удовлетворить этим требованиям можно, взяв шаг смещения окна анализа меньшим его длины. Чтобы перекрывающиеся участки сигнала при этом не обрабатывались несколько раз в составе разных окон можно использовать предложенную в [4] методику. Согласно ей сигнал анализируется блоками, равными шагу смещения окна (подокнами) а затем по результатам обработки нескольких подокон вычисляется оценка СПМ по окну анализа, состоящему из этих подокон. Шаг смещения окна анализа (размер подокна) в данной работе принят равным 6,6 мс (53 отсчета). Длины окон анализа, используемых для вычисления оценок СПМ, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Длины окон анализа, используемых для вычисления оценок СПМ

Группы частот	Нижняя	Верхняя
Определение типа шума	106 (2)	53 (1)
Режим декодирования 1, ширина бина 1	159 (3)	80 (1,5)
Режим декодирования 1, ширина бина 2	185 (3,5)	106 (2,5)
Режим декодирования 2	265 (5)	159 (3)
Оценка мощности вторых гармоник	106 (2)	53 (1)

Определение типа помехи. Поскольку шаг перемещения окна анализа был выбран меньше длины окна, то одни и те же участки сигнала будут входить в состав нескольких окон анализа. Понятно, что в этом случае для определения типа помехи необходимо сравнивать оценки энергии сигнала в полосе частот ННТР в наиболее близко расположенных окнах, не содержащих общих участков сигнала. Для выбранного шага смещения окна анализа оценки энергии сигнала надо сравнивать между i -м и $i-2, i-3$ окнами размером 106 отсчетов. Для частот верхней группы сравнивать надо усредненные данные по двум окнам размером в 53 отсчета.

Таким образом, для определения типа помехи в полосе частот нижней или верхней групп будут использоваться следующие условия:

$$\sum_{j=1,4} (S_{i-2,j} + S_{i-3,j}) > L_{strong} \cdot \max_{j=1,4} S_{i,j} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1,4} (S_{i-2,j} + S_{i-3,j}) > L_{small} \cdot \max_{j=1,4} S_{i,j} \quad (2)$$

где L_{strong}, L_{small} - коэффициенты, определяющие соотношение оценок энергий. Если выполняется (1), то помеха считается мощной, а если выполняется (2) – помеха считается слабой.

Уменьшение числа ложных пропусков цифры. В силу близкого расположения частот СК верхней группы и вторых гармоник частот нижней группы возможна ситуация, когда оценка СПМ на частоте второй гармоники существенно увеличивается за счет энергии СК из верхней группы частот. Поскольку большой уровень мощности второй гармоники трактуется как признак наличия в окне анализа речевого сигнала, в этом случае может произойти ложный пропуск цифры. Откорректировать оценки СПМ на частотах вторых гармоник можно в соответствии со следующим выражением:

$$S(2 \cdot f_i) = S'(2 \cdot f_i) - S(f_h) \frac{\sin(\pi \cdot (2 \cdot f_i - f_h) \cdot N / f_{smp})}{\pi \cdot (2 \cdot f_i - f_h) \cdot N / f_{smp}} \quad (3)$$

где $S'(f)$ – первоначальное значение оценки СПМ;

$S(f)$ – скорректированное значение оценки СПМ;

N – длина окна анализа при вычислении оценки СПМ на частотах вторых гармоник.

Если декодер работает в первом режиме, то используются откорректированные значения f_h и $S(f_h)$. Так как величина отклонения частоты СК от номинала находится по модулю, то f_h находится из предположения о максимальном воздействии гармоники СК верхней группы

на оценку СПМ на второй гармонике нижней группы. Если же декодер работает во втором режиме, коррекция (3) не выполняется.

Поскольку проверка величины мощности второй гармоники выполняется только для гармоник СК, коррекция (3) выполняется, только если вторая гармоника СК нижней группы расположена близко от СК верхней группы.

Схема работы декодера. Для удобства дальнейшего рассмотрения разделим процесс распознавания на три этапа. На первом этапе принятый сигнал разбивается на окна анализа и для каждого окна вычисляются оценки параметров СК и оценивается тип помехи. На втором этапе – принимается решение о том, присутствует ли на анализируемом окне сигнал ННТР, и при принятии положительного решения выполняется декодирование сигнала. На третьем этапе выполняется анализ результатов распознавания нескольких подряд идущих окон анализа для проверки выполнения требований стандарта по длительности сигнала. Здесь же принимается окончательное решение о декодировании сигнала ННТР.

Схема работы первого этапа для одной группы частот показана на рис. 1.

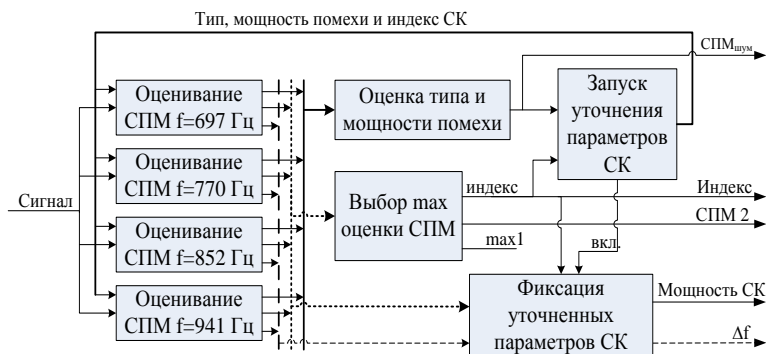


Рис. 1. Структурная схема первого этапа распознавания для нижней группы частот.

Блоки оценивания СПМ выполняют разбиение сигнала на окна и после обработки каждого подокна вычисляют оценки СПМ для нахождения типа помехи и предварительные оценки параметров СК. Далее, в зависимости от типа помехи, на соответствующий блок оценивания СПМ может быть выдан управляющий сигнал коррекции параметров СК. Результаты коррекции фиксируются в одноименном блоке и выдаются на блок решающего правила. Туда же передается оценка второй по мощности оценки СПМ в группе.

Структурная схема блока оценивания СПМ представлена на рис. 2.

Поступающий на вход блока оценивания СПМ сигнал разбивается на подокна длиной 53 отсчета и обрабатывается фильтром Герццеля [5]. Состояние фильтра Герццеля после завершения обработки подокна записывается в сдвиговый буфер (ЛЗ). Далее, на их основе находятся оценки СПМ с различной шириной бина по методике [4]. При поступлении сигнала

уточнения оценок параметров СК при наличии мощной помехи вычисляется оценка СПМ по окну длиной 265 отсчетов (блок с штрихованной рамкой). Отклонение частоты СК от номинала в этом случае принимается равным нулю. Если же поступает сигнал о наличии слабой помехи, то вычисляется оценка СПМ по окну длиной 186 отсчетов и находится оценка отклонения частоты СК от номинала и уточненное значение мощности СК [3] (блоки с штрихпунктирной рамкой). На выход блока подается уточненное значение оценки мощности СК. Для блока оценки СПМ на частоте верхней группы структура останется такой же, а измениться лишь количество подокон при вычислении оценок СПМ.

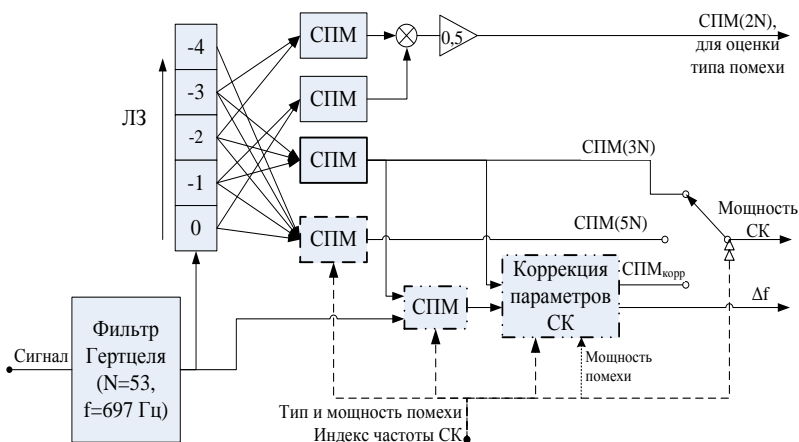


Рис. 2. Структура блока оценивания СПМ.

Работа решающего правила на втором этапе распознавания сводится к проверке, удовлетворяет ли анализируемый сигнал требованиям стандарта. Для этого выполняется стандартный набор проверок, описанный в частности в [2], и при выполнении коррекции параметров СК – выполняется проверка допустимости оценки отклонения частоты Δf от номинала. Если все условия выполняются, то принимается решение о том, что данное окно содержит сигнал ННТР и выполняется его декодирование.

На третьем этапе по результатам распознавания сигнала в нескольких окнах анализа выполняется проверка на допустимость длительности сигнала ННТР. При этом учитывается допустимость паузы длительностью до 10 мс, для чего допускается отсутствие распознавания цифры в двух подряд идущих окнах анализа на протяжении всего сигнала ННТР.

При определенном взаимном расположении окон анализа и сигнала ННТР, длительностью меньше допустимой, простой подсчет количества окон, в которых была обнаружена цифра, может дать неправильный

результат. При этом крайние окна будут заполнены сигналом лишь частично, и оценки СПМ СК в них будут пропорционально степени заполнения меньше, чем в центральных окнах. Для исключения подобной ситуации одно из окон анализа, в которых оценки СПМ СК изменяются, не рассматривается.

По результатам обработки каждого окна анализа генерируются пять логических значений:

8. *valid* - истинно, если в окне анализа был обнаружен сигнал ННТР;
9. *same* - истинно, если декодированный символ не изменился;
10. *down* - истинно, если в текущем окне мощность СК составляет больше 25%, но меньше 75 % мощности в предыдущем окне;
11. *len* - истинно, если мощность СК изменилась не более чем на 20 %.

Эти логические значения подаются на вход двум параллельно работающим конечным автоматам (КА). Первый автомат проверяет выполнение временных требований стандарта, а второй – проверяет, не изменилась ли цифра в соседних окнах. Графы переходов данных конечных автоматов (КА) представлены на рис. 3.

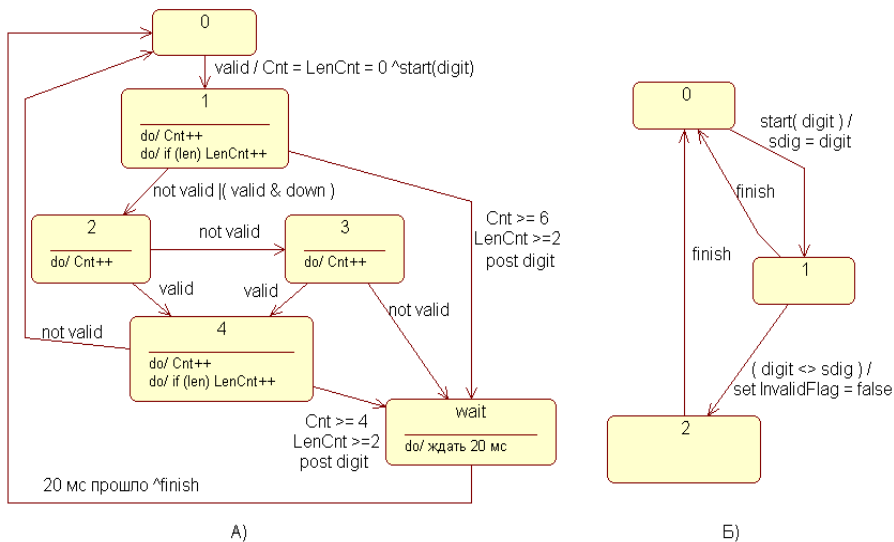


Рис. 3. Граф переходов КА, проверяющих выполнение временных требований стандарта (А) и постоянство определенной цифры (Б).

При обнаружении в текущем окне сигнала ННТР первый КА переходит в состояние 1 и выдает событие *start* на второй КА. В состоянии 1 КА подсчитывает количество одинарных и двойных окон, в которых сигнал ННТР был обнаружен. Первое значение накапливается в переменной *Cnt*, а второе – в *LenCnt*. При пропадании сигнала после его успешного

обнаружения, КА переходит поочередно в состояния 2 и 3. При появлении сигнала вновь, КА переходит в состояние 4, а при отсутствии сигнала более 2-х окон подряд – в состояние завершения обработки символа *wait*. После того, как более чем в 3-х окнах подряд сигнал не будет обнаружен, КА переходит в начальное состояние, генерируя при этом событие *finish*.

Второй КА отслеживает, изменяется ли распознаваемая цифра в соседних окнах. Если цифра изменилась, то это говорит о том, что ее появление вызвано помехой, а сама цифра должна считаться недействительной. По приходу события *start* цифра запоминается и КА переходит в состояние 1. Если в следующих окнах будет обнаружена другая цифра, выставляется флаг недействительности цифры, и КА переходит в состояние 2, где и остается до завершения приема цифры.

Если при генерации события *finish* второй КА находится в состоянии 1 – считается, что цифра распознана верно.

Результаты. Чтобы оценить качество распознавания сигналов ННТР при отклонении параметров СК от номинала с использованием методов [2, 6] и предложенного метода были построены усредненные зависимости количества верных и ложных распознаваний цифры от мощности белого шума. Для каждого значения мощности брались 200 реализаций шума, и для каждой из них подсчитывалось количество верных и ложных распознаваний всех возможных цифр при отклонении частоты и мощности каждой СК от номинала в пределах -5% – $+5\%$ и -10 dB – $+6$ dB соответственно. График данной зависимости представлен на рис. 4.

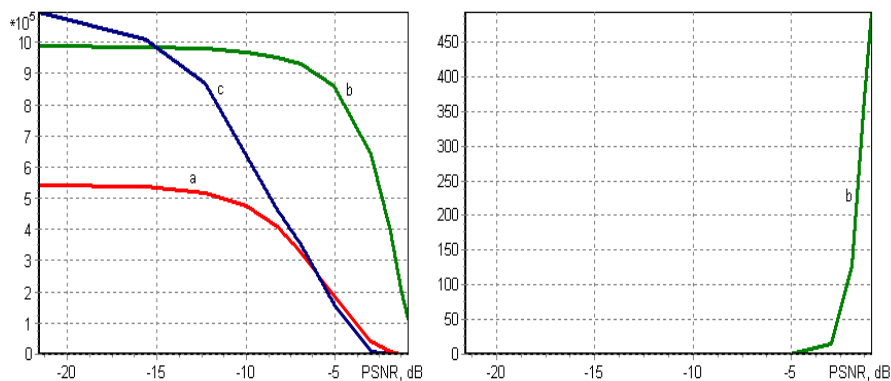


Рис. 4. Зависимость факта верного (слева) и ложного (справа) распознавания цифры от уровня шума. (а – метод [2]; б – метод [6]; с – предложенный метод).

Как можно заметить, предложенный метод обеспечивает самое большое количество верно распознанных цифр при малом уровне шума. При росте уровня помехи количество распознаваний снижается и достигает уровня

метода [2]. При этом на данном тесте предложенный метод не продемонстрировал ложных срабатываний.

Также, для проверки работоспособности методы в реальных условиях были проведены тесты talk-off, которые используются для определения частоты ложных срабатываний декодера на часто встречающихся в ТфОП сигналах – речи, музыке и т.п. По причине отсутствия у автора тестовых кассет, на которых записаны стандартные тесты Bellcore, по такому же принципу были созданы тестовые записи продолжительностью по 2 часа. Результат распознавания декодером данных тестовых записей приведен в таблице 2.

Таблица 2. Результаты talk-off тестов.

Тип тестового сигнала	Количество ложно определенных цифр за 2 часа		
	Метод [2]	Метод [6]	Предложенный метод
Музыка	1595	159	77
Речь	383	17	18

Таким образом, предложенный метод позволяет существенно улучшить качество распознавания сигнала ННТР в случаях значительных отклонений параметров СК от номинала и при наличии полигармонической помехи при сравнительно малых дополнительных затратах ресурсов и может быть использован при построении систем компьютерной телефонии, ориентированных на использование в отечественной телефонной сети.

Список литературы: 1. International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation Q.24, Multifrequency push-button signal detection, Fascicle VI.1, Blue Book, 1993. 2. Felder M., Mason J., Evals B., "Efficient dual-tone multi-frequency detection using the non-uniform discrete Fourier transform", IEEE Signal Processing Letters, vol. 5, pp.160-163, July 1998. 3. Колбасин В.А. Оценка отклонения от номинала частот двухтонального сигнала набора номера. Вестник НТУ "ХПИ". – 2005. - №59. – "Системный анализ, управление и информационные технологии". С 75-78. 4. Куценко А.С., Колбасин В.А. Модифицированный алгоритм вычисления спектральной плотности мощности для задачи распознавания двухтональных сигналов // Хмельницький: Вісник Технологічного університету Поділля, 2003. – № 4, ч. 2. – с. 217 - 220. 5. Goertzel G. An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series // American Math Monthly, 1958, Vol.65, pp 34-35. 6. Analog Devices, DSP Applications using the ADSP-2100 Family. Prentice-Hall, 1992.

Поступила в редколлегию 23.05.07