УДК 004.681.5

Мануилов И.Ю.

МНОГОТОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОМИКРОФОНОВ

Работа корреляционных алгоритмов [1] основана на выявлении зависимости между тестовым акустическим колебанием a(n) и сигналом, принимаемым приемником s(n) (оба сигнала дискретизируются в аппаратуре обнаружения, n - номер временного отсчета сигнала $n = \overline{0, N}$). В случае обнаружения зависимости между сигналами принимается решение о наличии радиомикрофона (гипотеза H_1), а в противном случае о его отсутствии (гипотеза H_0).

Предполагается, что мешающий сигнал представлен в виде нормального гауссовского шума. При справедливой гипотезе H_0 входной сигнал представляет собой чисто шумовую последовательность

$$S(n) = \xi_0(n),$$

где $\xi_0(n)$ - отсчеты шумового сигнала. При справедливой гипотезе H_1 сигнал на входе обнаружителя представляет собой аддитивную смесь детерминированного тестового сигнала a(n) и шума

$$S(n) = ka(n) + \xi_1(n),$$

где k – масштабный коэффициент, определяемый усилительными свойствами радиомикрофона, $\xi_1(n)$ - отсчеты шумового сигнала.

Для двухтонального тестового сигнала акустическое колебание a(n) представляет собой сумму двух гармонических функций

$$a(n) = \cos(\omega_1 n + \varphi_1) + \cos(\omega_2 n + \varphi_2), \quad \varphi_1, \varphi_2 \in [-\pi, \pi],$$

где ω_1, ω_2 - приращения фазы, φ_1, φ_2 - неизвестные начальные фазы

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{F_s}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi f_2}{F_s},$$

где f_1, f_2- частоты гармонических колебаний, F_S - частота дискретизации.

В первом приближении выборки $\xi_0(n)$ и $\xi_1(n)$ можно принять за совокупность некоррелированных гауссовских величин неизвестной интенсивности. Обозначим средние мощности шума величинами σ_0^2 и σ_1^2 соответственно.

Синтез алгоритмов обнаружения детерминированных сигналов неизвестной интенсивности на фоне нормального белого шума описан в [2]. Аналогично можно синтезировать алгоритм для обнаружения многотональных сигналов.

Учитывая взаимную независимость отсчетов сигнала s(n), их совместная плотность распределения вероятностей равна произведению распределений каждого отсчета, тогда функционалы правдоподобия для гипотез H_0, H_1 будут иметь вид

$$L_0(S) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_0\right)^N} \exp\left(-\frac{E_S}{2\sigma_0^2}\right),$$

$$L_1(S, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma_1^2}\left(E_S - 2k\sum_{n=1}^{N} s(n)\left[\cos(\omega_1 n + \varphi_1) + \cos(\omega_2 n + \varphi_2)\right] + k^2 E_A\right)\right)}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_1\right)^N},$$

где E_S – энергия сигнала s(n), $E_S = \sum_{n=1}^{N} s(n)^2$,

E_A – энергия акустического сигнала a(n), $E_A = \sum_{n=1}^{N} a(n)^2$.

В функционал $L_1(S, \varphi_1, \varphi_2)$ входят неизвестные параметры φ_1, φ_2. Чтобы избавиться от этой зависимости, необходимо провести усреднение по φ_1, φ_2.

Воспользуемся подстановкой

$$\sum_{n=1}^{N} s(n)a(n) = \sum_{n=1}^{N} s(n)[\cos(\omega_1 n + \varphi_1) + \cos(\omega_2 n + \varphi_2)] =$$

$$= Z^{(1)}\cos(\theta_1 + \varphi_1) + Z^{(2)}\cos(\theta_2 + \varphi_2),$$

где

$$Z^{(1)} = \sqrt{\left(z_1^{(1)}\right)^2 + \left(z_2^{(1)}\right)^2}, \quad Z^{(2)} = \sqrt{\left(z_1^{(2)}\right)^2 + \left(z_2^{(2)}\right)^2},$$

$$z_1^{(1)} = \sum_{n=1}^{N} s(n)\cos(\omega_1 n), \quad z_2^{(1)} = \sum_{n=1}^{N} s(n)\sin(\omega_1 n),$$

$$z_1^{(2)} = \sum_{n=1}^{N} s(n)\cos(\omega_2 n), \quad z_2^{(2)} = \sum_{n=1}^{N} s(n)\sin(\omega_2 n),$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{z_2^{(1)}}{z_1^{(1)}}\right), \quad \theta_2 = \arctan\left(\frac{z_2^{(2)}}{z_1^{(2)}}\right)$$

Тогда нетрудно показать что

$$L_1(S, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma_1^2}\left(E_s - 2k\left[Z^{(1)}\cos(\varphi_1 + \theta_1) + Z^{(2)}\cos(\varphi_2 + \theta_2)\right] + k^2 E_a\right)\right)}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_1\right)^N},$$

Усредняя функционал правдоподобия $L_1(S, \varphi_1, \varphi_2)$ по φ_1, φ_2 получим

$$L_1(S, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_1\right)^N}\exp\left(-\frac{E_s + k^2 E_a}{2\sigma_1^2}\right) I_0\left(\frac{kZ^{(1)}}{\sigma_1^2}\right) I_0\left(\frac{kZ^{(2)}}{\sigma_1^2}\right),$$

где $I_0(x)$ – функция Бесселя чисто мнимого аргумента первого рода нулевого порядка.

Полагая, что отношение сигнал/шум на выходе корреляторов огибающей велико

$$\frac{kZ^{(1)}}{\sigma_1^2} >> 1, \quad \frac{kZ^{(2)}}{\sigma_1^2} >> 1,$$

можно записать

$$L_1(S, \varphi_1, \varphi_2) \approx \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_1\right)^N}\exp\left(-\frac{E_s - 2k\left[Z^{(1)} - Z^{(2)}\right] + k^2 E_a}{2\sigma_1^2}\right).$$

Задачу обнаружения будем решать методом максимума правдоподобия. В нашем случае неизвестными являются параметры σ_0^2, σ_1^2 и масштабный коэффициент k. Найдем максимально правдоподобные оценки величин σ_0^2 и σ_1^2

$$\sigma_0^{*2} = \frac{E_s}{N},$$

$$\sigma_1^{*2} = \frac{E_s + k^2 E_a - 2k\left(Z^{(1)} + Z^{(2)}\right)}{N}.$$

После замены неизвестных значений параметров $\sigma_0^{\ 2}$ и $\sigma_1^{\ 2}$ их максимально правдоподобными оценками и выполнения ряда простых преобразований отношение функционалов правдоподобия примет вид

$$l(S) = \frac{L_1(S)}{L_0(S)} = \left(\frac{E_s}{E_s + k^2 E_a - 2k\left(Z^{(1)} + Z^{(2)}\right)}\right)^{\frac{N}{2}}.$$

Максимально правдоподобная оценка величины k равна

$$k^* = \frac{Z^{(1)} + Z^{(2)}}{E_A}.$$

Подставляя вместо неизвестной величины k в отношение функционалов правдоподобия ее максимально правдоподобную оценку и проведя ряд несложных преобразований, получим

$$l(S) = \left(\frac{1}{1 - \frac{\left[Z^{(1)} + Z^{(2)}\right]^2}{E_S E_A}}\right)^{\frac{N}{2}}.$$

Отсюда выразим оптимальное правило принятия решения о наличии радиомикрофона

$$\Lambda_0 < \left(\frac{1}{1 - \frac{\left[Z^{(1)} + Z^{(2)}\right]^2}{E_S E_A}}\right)^{\frac{N}{2}}.$$

Преобразуем неравенство в следующий вид

$$\frac{\left[Z^{(1)} + Z^{(2)}\right]^2}{E_S E_A} > \sqrt{1 - \Lambda_0^{-2/N}}.$$

Правая часть этого неравенства является константой

$$Z_0 > \sqrt{1 - \Lambda_0^{-2/N}},$$

а оптимальное правило принятия решения принимает вид

$$Z(N) > Z_0,$$

где Z(N) – сумма корреляций огибающих входных гармонических колебаний

$$Z(N) = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^{N} s(n)\sin(\omega_1 n)\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{N} s(n)\cos(\omega_1 n)\right)^2}}{\sqrt{E_S E_A}} +$$

$$+ \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^{N} s(n)\sin(\omega_2 n)\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{N} s(n)\cos(\omega_2 n)\right)^2}}{\sqrt{E_S E_A}}.$$

Мы получили оптимальное правило принятия решения для двухтонального алгоритма. Для оценки качества обнаружения в условиях замираний акустического сигнала следует воспользоваться приближенной акустической моделью помещения и исследовать качественные показатели алгоритма методом статистического моделирования. Такую модель можно построить на основе геометрической или волновой теории акустики [3].

Для построения модели помещения воспользуемся геометрической теорией акустики. В [3] приведен ряд формул, позволяющих рассчитать энергию и задержку прихода лучей от любого мнимого источника звука в предположении, что микрофон и действительный источник звука расположены в любых произвольных точках пространства. Это довольно сложные формулы с множеством степеней свободы. В нашем случае мы можем зафиксировать расположение источника тестового сигнала в любой конкретной точке, например, в геометрическом центре помещения. И если ввести декартову систему координат с началом в геометрическом центре помещения, то формула для вычисления расстояния d между микрофоном и мнимым источником звука упростится и примет вид

$$d_{lmn} = \sqrt{(x \pm lX)^2 + (y \pm lY)^2 + (z \pm lZ)^2},$$

где l, m, n - индексы мнимых источников звука $\in [0, \infty]$ (случай, когда l=m=n=0 - соответствует действительному источнику звука),

x, y, z - координаты микрофона,

X, Y, Z - линейные размеры помещения.

При каждом отражении энергия акустического сигнала уменьшается в $1 - \alpha$ раз, где α - коэффициент звукового поглощения поверхностей. Таким образом, колебание, воздействующее на микрофон, примет вид

$$a(t) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \alpha)^{(l+m+n)/2} a_N (t - d_{lmn}/C),$$

где a_N (t) - сигнал источника звука,

C - скорость распространения звука в воздухе.

Коэффициент поглощения можно приближенно рассчитать исходя из времени реверберации по формуле Сэбина [3]

$$\alpha = \frac{0.164V}{St_R},$$

где *V* - объем помещения; *S* - площадь поверхностей помещения; t_R - время реверберации.

Данная модель верна в предположении, что микрофон и источник звука ненаправленные, а помещение совершенно пустое с формой параллелепипеда и все его поверхности имеют одинаковый коэффициент поглощения. Также не учитываются потери при распространении звука в воздухе, которые для частот менее 4000 Гц пренебрежительно малы. Конечно, такая модель не претендует на полноту описания акустической картины, но она позволяет качественно оценить влияние акустических искажений на форму принимаемого сигнала.

При излучении гармонического колебания, зная задержку прихода и коэффициент поглощения для каждого луча можно найти соотношение между амплитудами и фазами излученного и принятого сигнала. Если колебания накладываются друг на друга, то результат определяется как сумма синусоидальных величин. В случае если колебания имеют одинаковую частоту, то их сумма имеет ту же частоту

$$\sum_{k=1}^{n} A_k \sin(\omega t + \varphi_k) = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где A_k, φ_k - амплитуда и фаза k-го колебания.

При n=2 имеют место следующие соотношения:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)},$$

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{A_1 \sin\varphi_1 + A_2 \sin\varphi_2}{A_1 \cos\varphi_1 + A_2 \cos\varphi_2},$$

На основе этих формул можно рассчитать амплитуду и фазу гармонического сигнала в любой точке помещения.

Список литературы

1. *Макаров Г. В., Быковников В. В., Пятунин А.Н.* Тональный алгоритм обнаружения радиомикрофонов. // Журнал радиоэлектроники. - 2000. - №11.

2. *Теория* обнаружения сигналов. / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; Под ред. П.А. Бакута. - М.: Радио и связь, 1984. - 440 с.

3. *Маньковский В.С.* Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. - М.: Искусство, 1966. -376 с.

Поступила 04.09.2006

УДК 004. 681

Гордиенко С.Б., Хорошко В.А.

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ЗАШУМЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ

Актуальность задачи защиты информации (ЗИ) от утечки по акустическим и виброакустическим каналам, порождаемым речевой деятельностью человека несомненна и занимает ведущее место в общем ряду существующих в области безопасности информации проблем. С другой стороны, ряд аспектов, влияющих на эффективность защиты речевой информации, зачастую остается за пределами внимания при организации системы информационной безопасности объектов, разработке и производстве средств защиты речевой информации (СЗРИ), их практическом применении. К аспектам, влияющим на снижение качества закрытия каналов утечки информации, а иногда и их непреднамеренному созданию в случае неквалифицированного проведения мер по ЗИ, в первую очередь следует отнести:

- необеспеченность оценок качества информационной безопасности, в том числе и при настройке СЗРИ, инструментальными средствами контроля;
- невнимание к угрозам компенсации излучаемых СЗРИ помех и перехвата содержания скрываемых переговоров при поверхностном соблюдении норм и требований по ЗИ;
- недооценку опасности выхода из строя (по различным причинам) аппаратуры ЗИ.

Первая проблема связана с активно развивающейся в настоящее время нормативной базой в области ЗИ: требования руководящих документов по номенклатуре измеряемых в ходе контроля параметров и точности их оценки.

Технические проблемы, стоящие перед разработчиками аппаратуры и специалистами, обеспечивающих нейтрализацию акустических каналов, могут быть проиллюстрированы на примере контроля сигналов электроакустических преобразований. Данная задача связана с наличием у некоторых технических устройств микрофонных свойств, вследствие чего под воздействием акустических волн в них наводятся электрические сигналы, которые по различным электрическим цепям и токопроводящим элементам конструкций могут распространяться за пределы контролируемой территории. Актуальность задачи подтверждается и тем, что уровни сигналов от незащищенных телефонных аппаратов на 2-3