



УДК 621.3.011.7

А. П. Бойко, Д. А. Улахович
Военная академия связи им. С. М. Буденного

Задача многокритериального выбора оптимального метода векторного квантования параметров линейного предсказания

Векторное квантование (ВК) широко применяется в параметрическом кодировании речевых сигналов и, в отличие от скалярного квантования, дает значительный выигрыш в объеме представления данных. Известен ряд методов ВК. В основном все они ориентированы на снижение таких показателей, как вычислительная сложность, требования к памяти и искажение спектра. Выбор метода ВК, наилучшего по всем показателям – задача многокритериального выбора и решается с использованием методов многокритериальной оптимизации. В статье анализируются 6 методов ВК. Рассматривается случай, когда для ВК десяти линейных спектральных корней выделяются 24 бит/кадр и решается задача многокритериальной оптимизации с использованием метода идеальной точки.

Векторное квантование, речевой сигнал, линейные спектральные корни, искажение спектра, вычислительная сложность, требования к памяти, многокритериальная оптимизация, метод идеальной точки

Среди задач, решаемых при построении речевых кодеков с линейным предсказанием (ЛП), важнейшая роль принадлежит задаче синтеза кодовых книг, основу которых составляет векторное квантование (ВК) параметров ЛП. В конечном счете качество речевого кодека определяется качеством кодовой книги. Последнее, в свою очередь, зависит от выбранного метода ВК [1]–[4]. В статье рассматриваются следующие методы ВК:

- расщепленное ВК (SVQ);
- многоступенчатое ВК (MSVQ);
- расщепленное многоступенчатое ВК (S-MSVQ);
- переключаемое расщепленное ВК (SSVQ);
- переключаемое многоступенчатое ВК (SwMSVQ);
- многопереключаемое расщепленное ВК (MSwSVQ).

Методы ВК характеризуются, прежде всего, числом бит, выделяемых на кадр, откуда следует структура векторного квантования и ее реализация, а именно распределение бит по ступеням, расщеплениям и переключениям. Для оценки качества ВК введены следующие критерии (показатели) [5]:

- искажение спектра речевого сигнала в результате ВК;
- вычислительная сложность;
- требования к памяти.

Цель работы – произвести анализ методов ВК по трем вышеперечисленным критериям и решить задачу многокритериального выбора оптимального метода ВК.

I. Анализ методов векторного квантования. Искажение спектра (SD) является одним из основных показателей речевого кодека, определяющих качество синтезируемого речевого сигнала. Спектральное искажение на i -м кадре [6] SD_i вычисляется по выражению (в децибелах)

$$SD_i = \sqrt{\frac{1}{(f_2 - f_1)} \int_{f_1}^{f_2} [10 \lg S_i(f) - 10 \lg \hat{S}_i(f)]^2 df},$$

где $S_i(f)$ – спектр мощности речевого сигнала на входе ВК; $\hat{S}_i(f)$ – спектр мощности речевого сигнала на выходе ВК; f_1 и f_2 – нижняя и верхняя частоты речевого сигнала.

Бит/кадр	SD, дБ					
	SVQ	MSVQ	S-MSVQ	SSVQ	SwMSVQ	MSwSVQ
24	0.29858288	0.12372535	0.17694657	0.15197244	0.12007013	0.03016417
23	0.3263387	0.12635670	0.17819981	0.17666924	0.12677232	0.03035383
22	0.33288558	0.13020832	0.18070686	0.17983792	0.13356720	0.03133525
21	0.33308664	0.14025695	0.18779512	0.18376366	0.13804648	0.13161054
20	0.56602665	0.1437772	0.18815670	0.18376732	0.14132517	0.13445875

Экспериментально установлено [6], что слышимые изменения вследствие спектральных искажений отсутствуют в следующих случаях:

- среднее значение искажений спектра SD не превышает 1 дБ;
- количество кадров, на которых SD_i принимает значения от 2 до 4 дБ, не превышает 2 %;
- отсутствуют кадры с SD_i > 4 дБ.

Среднее значение искажения спектра SD вычисляется по формуле

$$SD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SD_i,$$

где N – число кадров. Значения спектральных искажений для различных методов ВК десяти линейных спектральных корней в зависимости от числа бит, выделяемых на кадр, представлены в таблице.

Вычислительная сложность метода ВК – число элементарных математических операций (сложений, умножений и сравнений), необходимых для поиска наилучшего кодового слова в кодовой книге (книгах). При определении вычислительной сложности каждое сложение, умножение и сравнение считаются как одна элементарная операция. Для вычисления взвешенного евклидова расстояния между двумя M-мерными векторами потребуется M вычитаний, 2M умножений и M – 1 сложений. Всего потребуется 4M – 1 операций.

На векторное квантование выделяется b бит.

Тогда в кодовой книге содержится 2^b кодовых слов. Для вычисления взвешенного евклидова расстояния между входным M-мерным вектором x и каждым кодовым словом в кодовой книге необходимо (4M – 1)2^b операций и 2^b – 1 операций для поиска минимального взвешенного евклидова расстояния. Всего число вычислений для M-мерного вектора и b выделяемых бит составляет (4M – 1)2^b + 2^b – 1 или 4M · 2^b – 1 операций/кадр.

В таблице не представлено независимое векторное квантование (UVQ) полноразмерными кодовыми книгами, поскольку оно не применяется вследствие высокой вычислительной сложности.

На рис. 1 представлен график зависимости вычислительной сложности от числа бит/кадр для различных методов ВК. Мерой искажения при поиске оптимального кодового слова в кодовых книгах служило взвешенное евклидово расстояние.

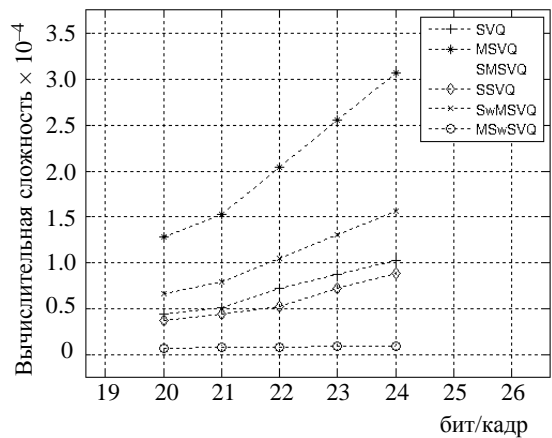


Рис. 1

Требования к памяти – это необходимый объем памяти для хранения кодовых слов кодовой книги. Мерой объема памяти является формат Float – 32-разрядный формат представления вещественных чисел. 1 Float = 4 Bytes = 32 bit.

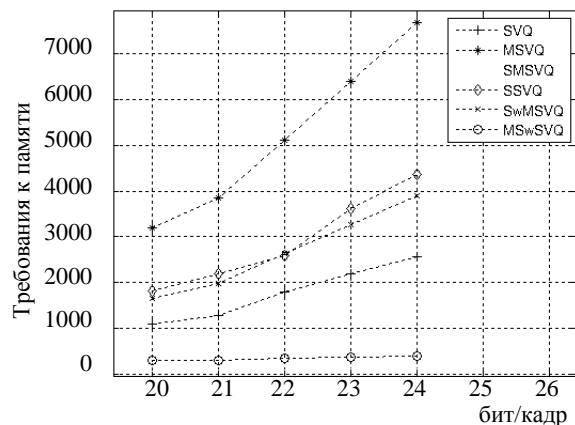


Рис. 2

II. Постановка задачи многокритериального выбора оптимального метода векторного квантования. Задачу выбора оптимального метода ВК можно сформулировать следующим образом: из множества методов ВК

$$X = \{SVQ, MSVQ, S-MSVQ, SSVQ, SwMSVQ, MSwSVQ\}$$

необходимо выбрать такой метод x_i ($i = \overline{1,6}$), чтобы

$$\mathbf{F}(x_i) = (F_1(x_i), F_2(x_i), F_3(x_i)) \rightarrow \min,$$

где $\mathbf{F}(x_i)$ – векторный критерий с локальными критериями $F_j(x)$, $j=1,2,3$; $F_1(x_i)$ – искажение спектра речевого сигнала, $F_2(x_i)$ – вычислительная сложность, $F_3(x_i)$ – требования к памяти.

Таким образом, задача выбора оптимального метода ВК представляет собой задачу многокритериального выбора, где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ – множество возможных решений; $\mathbf{F}(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x))$ – векторный критерий, образующий критериальное пространство R^n , причем $n \geq 2$. Для решения поставленной задачи рассмотрим более подробно известные методы ВК.

Зададим следующие отношения предпочтений на множестве возможных решений X в терминах множества возможных векторов $\mathbf{F}(x) \in R^3$:

- 1) $x' \succ x''$, если $\mathbf{F}(x') \succ \mathbf{F}(x'')$; $x', x'' \in X$;
- 2) $x' \prec x''$, если $\mathbf{F}(x') \prec \mathbf{F}(x'')$; $x', x'' \in X$;
- 3) x' и x'' несравнимы, если не выполняется ни соотношение $\mathbf{F}(x') \succ \mathbf{F}(x'')$, ни соотношение $\mathbf{F}(x') \prec \mathbf{F}(x'')$; $x', x'' \in X$.

В первом случае говорят, что x' лучше x'' ; во втором, что x'' лучше, чем x' ; в третьем случае говорят, что x' и x'' несравнимы. При рассмотрении задачи выбора метода ВК будем считать, что $\mathbf{F}(x') \succ \mathbf{F}(x'')$, если для всех компонент вектора $\mathbf{F}(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x))$ выполняются соотношения $F_i(x') \leq F_i(x'')$, $i \in 1, 2, 3$ и хотя бы одно из них строгое.

III. Многокритериальный выбор оптимального метода векторного квантования. Множество всех методов ВК X дискретно и конечно. Используя алгоритм попарного сравнения альтернатив в критериальном пространстве и аксиому Парето [7], сформируем множество Парето-оптимальных решений для случая, когда на ВК десяти линейных спектральных корней (LPC-10) выделяется 24 бит/кадр.

Пусть множество возможных решений X_1 включает все методы ВК:

$$X_1 = X = \{SVQ, MSVQ, S-MSVQ, SSVQ, SwMSVQ, MSwSVQ\}.$$

Первый шаг алгоритма нахождения множества Парето-оптимальных решений заключается в последовательном сравнении первой альтернативы SVQ со всеми остальными альтернативами множества решений X_1 . При этом имеем следующие пары сравнений: (SVQ, MSVQ); (SVQ, S-MSVQ); (SVQ, SSVQ); (SVQ, SwMSVQ); (SVQ, MSwSVQ).

Пара SVQ, MSVQ не сравнима по отношению \geq . В паре SVQ, S-MSVQ $\mathbf{F}(SVQ) \prec \mathbf{F}(S-MSVQ)$, следовательно, SVQ исключается из множества возможных решений как заведомо неоптимальное.

Новое множество возможных решений X_2 содержит все методы ВК из множества X_1 , кроме SVQ:

$$X_2 = \{X_1 | SVQ\} = \{MSVQ, S-MSVQ, SSVQ, SwMSVQ, MSwSVQ\}.$$

Второй шаг заключается в последовательном сравнении альтернативы MSVQ со всеми остальными из множества X_2 . Пары (MSVQ, S-MSVQ) и (MSVQ, SSVQ) не сравнимы по отношению \geq . В паре (MSVQ, SwMSVQ) имеем $\mathbf{F}(MSVQ) \prec \mathbf{F}(SwMSVQ)$, поэтому MSVQ исключается из множества возможных решений как заведомо неоптимальное. Множество возможных решений X_3 образуется исключением MSVQ из множества X_2 :

$$X_3 = \{X_2 | MSVQ\} = \{S-MSVQ, SSVQ, SwMSVQ, MSwSVQ\}.$$

Третий шаг алгоритма заключается в последовательном сравнении альтернативы S-MSVQ со всеми остальными альтернативами множества решений X_3 . Все пары сравнений при этом оказываются не сравнимы по отношению \geq . Так как решение S-MSVQ осталось недоминируемым, принимаем его как Парето-оптимальное и удаляем из множества возможных решений. Очередное множество возможных решений X_4 теперь включает в себя следующие 3 метода ВК:

$$X_4 = \{X_3 | S-MSVQ\} = \{SSVQ, SwMSVQ, MSwSVQ\}.$$

На четвертом шаге альтернатива SSVQ сравнивается с двумя остальными альтернативами множества X_4 . Решения (SSVQ, SwMSVQ) не сравнимы по отношению \geq . В паре (SSVQ, MSwSVQ) выполняется соотношение $\mathbf{F}(\text{SSVQ}) < \mathbf{F}(\text{MSwSVQ})$, следовательно, вариант SSVQ исключается из множества возможных решений как заведомо неоптимальный. Множество возможных решений X_5 оказывается состоящим из двух альтернатив:

$$X_5 = \{X_4 | \text{SSVQ}\} = \{\text{SwMSVQ}, \text{MSwSVQ}\}.$$

На пятом шаге сравниваем SwMSVQ с MSwSVQ. Поскольку $\mathbf{F}(\text{SwMSVQ}) < \mathbf{F}(\text{MSwSVQ})$, удаляется SwMSVQ как заведомо неоптимальное, и в результате остается одно решение MSwSVQ, которое является Парето-оптимальным.

Таким образом, полученное множество Парето-оптимальных решений состоит из двух альтернатив:

$$X_P = \{S - \text{MSVQ}, \text{MSwSVQ}\},$$

из которых необходимо выбрать единственное эффективное решение, для чего используем метод идеальной точки [8], предварительно приведя все показатели качества ВК к нормированным, безразмерным величинам.

Векторные критерии Парето-оптимальных решений принимают следующие значения:

$$\mathbf{F}(S - \text{MSVQ}) = (0.17694657 \quad 807 \quad 204)^T,$$

$$\mathbf{F}(\text{MSwSVQ}) = (0.03016417 \quad 900 \quad 396)^T,$$

откуда после нормировки имеем:

$$\hat{\mathbf{F}}(S - \text{MSVQ}) = (1 \quad 0.89666667 \quad 0.51515152)^T,$$

$$\hat{\mathbf{F}}(\text{MSwSVQ}) = (0.1704750 \quad 1 \quad 1)^T.$$

Определим идеальную точку как вектор, состоящий из минимальных значений каждого показателя качества:

$$\mathbf{F}_{\text{ид}} = \left(\begin{array}{ccc} \min_{x \in X} F_1(x) & \min_{x \in X} F_2(x) & \min_{x \in X} F_3(x) \end{array} \right).$$

Тогда решением задачи многокритериального выбора будем считать точку, вектор значений показателей качества в которой по норме минимально отличается от идеальной точки:

$$\|\mathbf{F}(x) - \mathbf{F}_{\text{ид}}\| \rightarrow \min, x \in X.$$

Идеальная точка принимает в пространстве критериев значение

$$\mathbf{F}_{\text{ид}}(x) = (0.1704750 \quad 0.89666667 \quad 0.51515152).$$

Тогда евклидовы расстояния между идеальной точкой и векторными критериями оказываются равными:

$$|\hat{\mathbf{F}}(S - \text{MSVQ}) - \mathbf{F}_{\text{ид}}| = 0.8295,$$

$$|\hat{\mathbf{F}}(\text{MSwSVQ}) - \mathbf{F}_{\text{ид}}| = 0.4957.$$

Следовательно, метод MSwSVQ, обладающий в пространстве критериев наименьшим расстоянием до идеальной точки, является оптимальным.

На основании исследований известных методов ВК и их параметров решена задача многокритериального выбора оптимально метода ВК с использованием метода идеальной точки. В статье рассматривался случай, когда на ВК десяти линейных спектральных корней выделялось 24 бит/кадр. Решение задачи многокритериального выбора для случаев с другим количеством бит на кадр не будет иметь принципиальных отличий. Лучшим выбором явилось многопереключаемое расщепленное ВК (MSwSVQ). Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при построении низкоскоростных вокодеров с линейным предсказанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gersho A., Gray R. Vector quantization and signal compression / Kluwer Academic Publishers. Boston, 1992.
2. Макхоул Дж. Векторное квантование при кодировании речи // ТИИЭР. 1985. Т. 73, № 11. С. 19–60.
3. Saoudi S., Boucher J. M., Gayader A. Optimal scalar quantization of the LSP and the LAR for speech coding // Intern. conf. on spoken language processing, Kobe, Japan, nov. 18–22, 1990. P. 101–104.
4. Бабкин В. В. Вокодер 600 бит/с // Тез. докл. 9-й Междунар. конф. и выставка «ЦОС и ее применение», Москва, 28–30 марта 2007 г. С. 4–8.
5. Satya Sai Ram M., Siddaiah P., Madhavi Latha M. Multi switched split vector quantizer // IEEE Electronic and Communication Engineering. 2008. Vol. 2, № 1. P. 90–95.

6. Palival K. K., Atal B. S. Efficient vector quantization of LPC parameters at 24 bits/frame // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1993. Vol. 1, № 1. P. 3–14.

7. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

8. Ланнэ А. А., Улахович Д. А. Многокритериальная оптимизация. СПб.: ВАС, 1984.

A. P. Boiko, D. A. Ulahovich

S. M. Budyonny military academy of telecommunication

THE PROBLEM OF MULTI-CRITERIA CHOICE OF OPTIMAL METHOD OF VECTOR QUANTIZATION OF LINEAR PREDICTION PARAMETERS

Vector quantization (VQ) is widely used in parametric coding of speech signals. Unlike scalar quantization, vector quantization gives a considerable gain in the volume of data. A number of VQ methods is known. Basically they are all focused on the reduction of indicators such as computational complexity, memory requirements, and the distortion of spectrum. Choosing the best method of VQ on all counts is the task of a multicriterion choice and it is solved using the methods of multicriteria optimization. The article provides analysis of six methods of VQ. We consider the case when for VQ ten linear spectral roots (LSR) 24 bits/frame are extracted and multicriteria optimization problem is solved using the method of ideal point.

Vector quantization, speech signal, linear spectral roots, distortion of the spectrum, computational complexity, memory requirements, multicriteria optimization, method of ideal point

УДК 621.391

Д. М. Клионский, А. М. Голубков, Д. И. Каплун, М. С. Куприянов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Адаптивный алгоритм обработки гидроакустических сигналов

Рассмотрен адаптивный алгоритм обработки сигналов антенных решеток в режиме реального времени, основанный на итерационной процедуре отыскания набора весовых коэффициентов. Приведены результаты анализа данного алгоритма, даны рекомендации по его практическому применению в различных условиях.

Адаптивный алгоритм, гидроакустический мониторинг, гидроакустический сигнал

Гидроакустический сигнал, проходящий через среду, искажается этой средой и смешивается с другими сигналами, в том числе и с шумами. В результате полезный сигнал поступает на приемник в искаженной и зашумленной форме. В этом случае задача адаптивного алгоритма состоит в оценивании полезной составляющей сигнала. Другими словами, необходимо достигнуть минимума среднеквадратической ошибки оценивания полезного сигнала за минимальное количество шагов адаптации.

В настоящее время отмечается значительный интерес к вопросам обработки сигналов, принятых с помощью антенных решеток, особенно в

сейсмологии и гидролокации, что привело к исследованиям различных видов оптимальных фильтров для решения данных задач. В целях удобства и обеспечения универсальности при программно-аппаратной реализации такого рода фильтров широкое применение получило их моделирование в программных системах MATLAB, LabView, Simulink и пр. На вход модели поступает ряд временных выборок от каждого из элементов антенны. Формируемый выходной сигнал решетки представляет собой взвешенную сумму всех выборок. На рисунке представлено устройство для обработки сигналов, получаемых с элементов решетки, – процессор.