

引用格式:周瑾,乔树山,凌康,等. 基于 G. 729 的快速固定码书搜索算法[J]. 微电子学与计算机,2020,37(11):13-16.
[ZHOU J,QIAO S S,LING K, et al. A new method of fast fixed-codebook search algorithm on G. 729 coding[J]. Microelec-
tronics & Computer,2020,37(11):13-16.]

基于 G. 729 的快速固定码书搜索算法

周 瑾^{1,2}, 乔树山^{1,2}, 凌 康¹, 詹 毅¹, 蒋见花^{1,2}

(1 中国科学院 微电子研究所,北京 100029;2 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 共轭结构代数码激励线性预测编码算法(Conjugate-Structure Algebraic-Code Excited Linear-Prediction, CS-ACELP)的固定码书搜索算法通过嵌套循环计算出码书矢量,这个算法的重要缺陷是嵌套循环深度大,时间复杂度
高,计算量大. 在重排序搜索(Reordering Search Sequence)算法的基础上,对搜索结构进行改进. 将预搜索部分获得的
组合脉冲直接用于下一步的全搜索,将嵌套循环的深度由 4 层降至 2 层,降低时间复杂度和计算量. 并且与固定码书
搜索的几个经典算法相比,搜索次数减少了 30%到 98%不等,同时具有优于 G. 729A 算法的优越编解码音质.

关键词: G. 729;固定码书搜索;重排序搜索算法;PESQ

中图分类号: TP37

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2020)11—0013—04

A new method of fast fixed-codebook search algorithm on G. 729 coding

ZHOU Jin^{1,2}, QIAO Shu-shan^{1,2}, LING Kang¹, ZHAN Yi¹, JIAN Jiang-hua^{1,2}

(1 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 10029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China)

Abstract: In Conjugate-Structure Algebraic-Code Excited Linear-Prediction (CS-ACELP) algorithm, the algebraic
codebook search calculation is through the nested loops. This leads the algorithm with a large computation, high
computational complexity and time complexity. After thoroughly analyzing the reordering search sequence approach, this
paper proposes a fast search method for fixed-codebook search based on modification of the search structure. In the proposed
method, the combination of pulses obtained in the pre-search are directly used for the next full search. Therefore, the depth
of nested loops in search is mitigated from 4 to 2. Compared with several other classic algorithms for fixed-codebook search,
search times of the proposed method get a decreases of 30% to 98%. This method effectively reduces the computational
complexity and time complexity, and codec sound quality is better G. 729A.

Key words: G. 729; Fixed-codebook search; Reordering search sequence approach; PESQ

1 引言

码激励线性预测编码(Code Excited Linear Prediction, CELP)技术提高了语音质量,保证了低
比特率条件下的高质量语音编码. 其中的固定码书
搜索算法用于逼近经过长时分析预测和短时分析预

测后的加权语音与实际语音的误差. 固定码书搜索
有一个重要的缺点,即计算量非常大^[1]. 代数码激励
线性预测(Algebraic CELP, ACELP)技术的出现
使改善了这一问题,固定码书结构采用交错单脉冲
排列(Interleaved Single-Pulse Permutation, IS-
PP)设计方案. 使用代数码书,避免了对具体码本

的搜索,提高了搜索效率^[2]. ACELP 技术广泛应用于诸如音频编码技术中,但耗尽式全搜索固定码本算法也存在计算量较大的问题,因此 ITU-T 推出的 G. 729 算法和 G. 729A 算法,对于其中的 ACELP 部分的固定码书搜索算法分别采用重点搜索算法(Focused Search approach)和深度优先树搜索算法(Depth-First Tree Search approach, DFTS)进行优化^[3].

在 G. 729 算法中自适应码书和固定码书部分的运算量也占据整体运算量 62% 的比例^[4]. 为了进一步降低搜索次数,研究人员提出了不同的优化算法. 例如,脉冲替换搜索方法(Pulse replace search approach)减少了搜索次数和搜索误差^[5]. 无迭代脉冲替换(Iteration-free pulse replacement, IFPR)方法大大减少了码本搜索的数量和复杂性^[6]. G729. 1 采用了全局脉冲替换(Global pulse replacement, GPR)^[7]. 一种改变的码本结构被应用到耗尽式全搜索算法,重点搜索算法和 DFTS 算法中,从而极大地减小了搜索范围^[8]. 重排序搜索方法对每组码书上的码字位置重新排序,挑选出最大概率获得理想值的 4 个脉冲位置,以此减小搜索范围^[9]. 这些方法在显著降低码书搜索算法复杂度的同时,编解码语音质量也在同步下降.

2 G. 729 固定码书搜索算法

固定码书搜索在 CELP 算法中的作用是通过码字的搜索逼近语音的经过短时、长时预测后的信号,即逼近由自适应预测所得的语音信号与原始语音的误差,从而为合成语音提供更精确的误差补偿. G. 729 中的固定码书采用代数码书结构,码书中码字通过简单的代数表示,有利于存储,简化搜索复杂度,具有良好的鲁棒性.

表 1 固定码本的结构

脉冲	幅度	组	位置
i_0	$s_0: \pm 1$	T_0	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
i_1	$s_1: \pm 1$	T_1	1, 6, 11, 16, 21, 26, 31, 36
i_2	$s_2: \pm 1$	T_2	2, 7, 12, 17, 22, 27, 32, 37
i_3	$s_3: \pm 1$	T_3	3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38
		T_4	4, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39

码书结构如表 1 所示,为 ISPP 设计方案. 在码书中,每个码字矢量包含 4 个非零脉冲. 最佳码字矢量的搜索通过最大化式(1)得到.

$$\beta_{ki} = \frac{C_k^2}{E_k} = \frac{\left(\sum_{n=0}^{39} (d(n)c_k(n))^2 \right)}{c_k' \Phi c_k} \quad (1)$$

式中, $c(k)$ 是第 k 个固定码书矢量,包含 4 个幅度为 ± 1 的非零脉冲. $d(n)$ 是目标信号 $x'(n)$ 和冲激响应 $h(n)$ 卷积后经加权滤波器滤波后的矢量. Φ 代表 $d(n)$ 的自相关矩阵.

在 G. 729 算法中采用了简化计算过程方法. 脉冲的幅度通过 $d(n)$ 估算,式(1)中的 C_k 和 E_k 可分别简化如式(2)和(3)所示,其中 s_i 是 $d(m_i)$ 的符号, Φ 的矩阵元素也可以由 $\varphi'(i, i) = 0.5\varphi(i, i)$ 和 $\varphi'(i, j) = \text{sign}(d(i))\text{sign}(d(j))\varphi(i, j)$ 替代.

$$C = \sum_{i=0}^3 s_i d(m_i) \quad (2)$$

$$E = \sum_{i=0}^3 \varphi(m_i, m_i) + 2 \sum_{i=0}^2 \sum_{j=i+1}^3 s_i s_j \varphi(m_i, m_j) \quad (3)$$

因此式(1)可以修改为如(4)所示.

$$\frac{C_k^2}{E_k} = \frac{(|d(m_0)| + |d(m_1)| + |d(m_2)| + |d(m_3)|)^2}{2 \sum_{i=0}^3 \varphi'(m_i, m_i) + 2 \sum_{i=0}^2 \sum_{j=i+1}^3 \varphi'(m_i, m_j)} \quad (4)$$

如果对码书应用耗尽式全搜索,需要用深度为 4 的嵌套循环对 $8 \times 8 \times 8 \times 16 = 8192$ 种组合进行比较,时间复杂度为 $O(n^4)$. 为了减少计算次数,在 G. 729 中采用了重点搜索算法. 对嵌套循环设置阈值条件. 在最差的情况下完成一次搜索需要 $90 \times 16 = 1440$ 次计算,时间复杂度仍为 $O(n^4)$.

在 G. 729A 建议的 DFTS 算法中,对嵌套循环进行重新拆分组合,使其计算简化. 最终所需的搜索次数为 $(2 \times 8 + 8 \times 8) \times 2 \times 2 = 320$,算法时间复杂度是 $O(n^2)$.

3 固定码书搜索优化算法

3.1 重排序搜索算法

根据目标信号与滤波后的固定码书向量之间的均方加权误差,重排序搜索算法对码书搜索的中每组脉冲的顺序进行重新排序. 计算单个脉冲的均方加权误差也即计算单个脉冲在误差逼近中的贡献,由公式(5)估算.

$$\beta_{ki} = \frac{C_k^2}{E_k} = \frac{(|d(m_i)|)^2}{\varphi(m_i, m_i)} \quad (5)$$

然后在每组上选择前 4 个位置,这些位置上的脉冲覆盖了 G. 729 算法中 95% 的脉冲出现统计概率. 再对所选的四组 4 个位置应用全搜索后,可获得最终码字矢量. 因此,搜索次数为 $4 \times 8 + 4 \times 4 \times 4 \times 2 = 544$, $4 \times 8 + 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 2 = 544$, 时间

复杂度为 $O(n^4)$. 图 1 展示了重新排序搜索序列方法的流程.

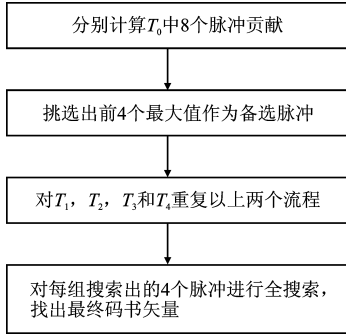


图 1 重排序搜索方法的系统流程图

3.2 优化算法

重排序搜索方法与 G. 729 算法的重点搜索算法相比具有更少的搜索时间. 通过统计脉冲概率的方式, 可以看出在预搜索过程中挑选的脉冲是有较高概率获取最佳脉冲. 但是在接下来的搜索步骤中, 使用嵌套循环对预选脉冲进行全搜索的方法仍然具有较大的计算量. 因此减少嵌套循环的深度, 改变搜索结构, 并应用树搜索方法提高一组码书矢量搜索精度. 将码书分为两个部分, 在预搜索步骤中对组合脉冲的 β_{ki} 进行计算, 得到两组码字矢量. 然后将全搜索应用于两个码字矢量搜索. 以此方式, 可以加快搜索过程, 显著降低算法时间复杂度和搜索次数.

该新方法的详细步骤如下.

第一步, 预搜索阶段对 (i_0, i_1) 组合进行搜索, 得到前 4 个最大 β_{k1} 的组合, 并将组合位置按照 β_{k1} 大小降序排列. 计算公式如(6) 所示.

$$\beta_{k1} = \frac{C_k^2}{E_k} = \frac{(|d(m_0)| + |d(m_1)|)^2}{\varphi'(m_0, m_0) + \varphi'(m_1, m_1) + \varphi'(m_0, m_1)} \quad (6)$$

第二步, 应用树搜索方法, 将第一步中的搜索结果加入到 (i_2, i_3) 的计算式中, 进一步提高脉冲搜索精度, 增加最佳脉冲出现概率. $\max 0$ 是 (i_0, i_1) 组合搜索中获得最大值 β_{k1} 的 i_0 的位置, $\max 1$ 即为 (i_0, i_1) 组合中 i_1 的位置. 同样得到前 4 个最大 β_{k2} 的组合, 并按照降序排列. 计算式如(7) 所示.

$$\beta_{k2} = \frac{C_{k2}^2}{E_{k2}} = \frac{(|d(m_2)| + |d(m_3)|)^2}{e_1 + e_2}$$

$$e_1 = \varphi'(m_2, m_2) + \varphi'(m_3, m_3)$$

$$e_2 = \varphi'(m_2, m_3) + \varphi'(\max 1, m_3) + \varphi'(\max 0, m_3) \quad (7)$$

第三步, 对于前两步已经挑选出的 (i_0, i_1) 和 (i_2, i_3) 两组组合, 不改变内部顺序. 将其视为包含 2 个幅度为 ± 1 的非零脉冲的码书矢量. 对两组矢量进行全搜索, 获得最大 β_{k3} , 得到最佳 (i_0, i_1, i_2, i_3) 组合;

第四步, 将 (i_2, i_3) 替换为 (i_2, i_4) , 重复第二步和第三步, 得到最大 β_{k4} 和最佳 (i_0, i_1, i_2, i_3) 组合. 对比 β_{k3} 和 β_{k4} , 确定最终脉冲组合.

第一步中的搜索组合共 64 种.

$(i_0, i_1) : (0, 1), (0, 6), \dots, (35, 31), (35, 36)$

假设搜索出的前 4 组合为 $(5, 16), (0, 6), (30, 21), (25, 11)$. 那么第二步中 $\max 0$ 为 5, $\max 1$ 为 16, 搜索组合加入 $\max 0$ 和 $\max 1$ 共 64 种.

$(5, 16, i_2, i_3) : (5, 16, 2, 3), (5, 16, 2, 8), \dots, (5, 16, 37, 33), (5, 16, 37, 39)$

若前 4 组脉冲组合为 $(5, 16, 7, 3), (5, 16, 17, 23), (5, 16, 2, 33), (5, 16, 12, 13)$, 可以得到前 4 组 (i_2, i_3) 组合 $(7, 3), (17, 23), (2, 33), (12, 13)$. 在第三步中将第一步的 4 个脉冲 (i_0, i_1) 组合与第二步得到的 4 个脉冲组合 (i_2, i_3) 进行充分搜索即可得到最佳脉冲组合 (i_0, i_1, i_2, i_3) . 按照同样的方法得到最佳脉冲组合 (i_0, i_1, i_2, i_4) , 两个脉冲组合的均方加权误差值即可得到最佳固定码书矢量.

最终的搜索次数 $8 \times 8 + (8 \times 8 + 4 \times 4) \times 2 = 224$ 次, 时间复杂度是 $O(n^2)$. 因此, 改变搜索结构, 拆分嵌套循环是一种有效的降低计算复杂性的算法.

4 实验结果与分析

将改进算法的性能与耗尽式全搜索, 重点搜索方法以及 DFTS 进行了比较. 测试材料包含不同情景下的中文和英文语音, 总持续时间为 517 秒. 从三个方面对几种方法的性能进行了比较: 搜索次数, 时间复杂度, 和语音质量. 对于语音编解码器, 已提出并被广泛接受的一种测量语音质量的方法是平均意见分值 (Mean Opinion Score, MOS). ITU-T 建议 P. 862 提供了一种 PESQ 算法获得 MOS-LQO 分值的客观方法^[10]. 本文使用 PESQ 算法评估和比较语音质量.

表 2 展示了几种算法之间的搜索次数和时间复杂度的比较. 本文所提出算法的搜索时间最少. 与耗尽式全搜索算法相比, 计算复杂度降低了 97%. 与重点搜索和原重排序搜索方法相比, 计算复杂度降低了 84% 和 59%. 仅是深度优先树搜索方法的计算

复杂度的 70％,同时具有最低的时间复杂度.

表 2 搜索次数和时间复杂度对比

搜索算法	搜索次数	时间复杂度
耗尽式全搜索算法	8 192	$O(n^4)$
重点搜索算法	1 440	$O(n^4)$
原始重排序算法	544	$O(n^4)$
DFTS	320	$O(n^2)$
改进算法	224	$O(n^2)$

表 3 展示了建议的方法与 G. 729 和 G. 729A 之间的 MOS-LQO 分值的比较. 本文提出算法在大大降低算法复杂度的同时,所提出的方法获得了比 G. 729A 更好的语音质量,与 G. 729 几乎相同的语音质量,甚至比 G. 729 更好.

表 3 MOS-LQO 分值比较

语音	G. 729	G. 729A	Proposed approach
男 1(英)	3. 622	3. 524	3. 589
女 1(英)	3. 575	3. 469	3. 560
男 2(英)	3. 655	3. 574	3. 643
女 2(英)	3. 593	3. 508	3. 575
儿童(中)	3. 440	3. 368	3. 449
语音提示(英 & 中)	3. 366	3. 343	3. 364
通话(中)	3. 901	3. 872	3. 898
合唱(中)	3. 315	3. 227	3. 318

在对 MOS-LQO 分值进行比较过程中,发现了在两个语音材料中本文所提出方法的 MOS-LQO 分值高于 G. 729 算法的情况. 经过分析,发现这种情况存在于在噪声较大的测试材料中. 推测是在误差逼近的过程中,欠饱和搜索避免了对噪声的合成. 因此实施了一个实验以验证猜想. 将测试材料中信噪比高的四个英文材料加上高斯白噪声,使其信噪比降至 5dB,对比三种算法的 MOS-LQO 分值,实验结果如表 4 所示. 从实验数据可以看出,在低信噪比的情况下,提出的方法与 G. 729 算法的 PESQ 评分差距缩小甚至超过 G. 729,甚至 G. 729A 的评分也有超过 G. 729,验证了猜想.

表 4 SNR=5dB 的语音 MOS-LQO 分值比较

语音	G. 729	G. 729A	Proposed approach
男 1(英)	3. 471	3. 431	3. 469
女 1(英)	3. 447	3. 458	3. 560
男 2(英)	3. 483	3. 476	3. 480
女 2(英)	3. 394	3. 408	3. 391

5 结束语

本文介绍了一种改进重排序搜索算法,在预搜索过程通过改变搜索结构,减小嵌套循环深度,对组合脉冲矢量进行全搜索. 这种改进算法与耗尽式全搜索算法、重点搜索算法、DFTS 和原始重排序算法的最大搜索次数相比分别减少了 97％、84％、30％和 59％. 通过应用组合脉冲搜索和树搜索,在大幅减少搜索次数、降低算法时间复杂度的情况下也保持了良好的语音质量.

参考文献:

[1] CHEN J H, THYSSEN J. Analysis-by-synthesis speech coding[M]. BENESTY J, SONDHI M M, HUANG Y A. Springer Handbook of Speech Processing. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 360-377.

[2] ITU. ITU-T G. 729 ANNEX D-1998Coding of speech at 8 Kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP) [S]. Switzerland: ITU, 1996.

[3] ITU. ITU-T Recommendation G. 729 Annex AReduced complexity 8 Kbit/s CS-ACELP speech codec [S]. Switzerland: ITU, 1996.

[4] 张艳萍, 朱忠进, 王文龙. 基于 G. 729 的固定码书搜索的改进性研究[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 203(6): 533-538. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-7070. 2011. 06. 005.

ZHANG Y P, ZHU Z J, WANG W L. Fixed codebook improvement research based on G. 729 [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 3 (6): 533-538. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-7070. 2011. 06. 005.

[5] PARK H, CHOI Y, LEE D. Efficient codebook search method for ACELP speech codecs [C]// Speech Coding, 2002, IEEE Workshop Proceedings. Ibaraki, Japan, IEEE, 2002: 178-187.

[6] LEE E D, YUN S H, LEE S I, et al. Iteration-free pulse replacement method for algebraic codebook search[J]. Electronics Letters, 2007, 43(1): 59-60. DOI: 10. 1049/el:20073320.

[7] ITU. ITU-T Recommendation G. 729. 1, G. 729Based embedded variable bit-rate coder: An 8-32 Kbit/s scalable wideband coder bitstream interoperable with G. 729[S]. Switzerland: ITU, 2006.

- ing. Cancun, Mexico:IEEE, 2008: 963-972.
- [3] ZHU L H, NGW K, CHENG J. Structure and attribute index for approximate graph matching in large graphs [J]. Information-Systems, 2011, 36(6): 958-972.
- [4] KHAN A, LI N, YANX F, et al. Neighborhood-based fast graph search in large networks [C]//Proceedings of 2011 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Athens, ACM, 2011: 901-912.
- [5] KPODJED S, GALINIER P, ANTONIOL G. Using local similarity measures to efficiently address approximate graph matching [J]. Discrete Applied Mathematics, 2014(164): 161-177.
- [6] GLOVER F. Tabu search-Part I [J]. ORSA Journal on Computing, 1989, 1(3): 135-206.
- [7] DUTTA S, NAYEK P, BHATTACHARYA A. Neighbor aware search for approximate labeled graph-matching using the chi-square statistics [C]//Proceedings of the 26th International Conference on World-Wide Web. Perth: ACM, 2017: 1281-1290.
- [8] ARORA A, SACHAN M, BHATTACHARYA A. Mining statistically significant connected subgraph in vertex labeled graphs [C]//Proceedings of 2014 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Snowbird: ACM, 2014: 1003-1014.
- [9] DUTTA S, BHATTACHARYA A. Most significant substring mining based on chi-square measure [C]//Proceedings of 14th Pacific-Asia Conference Knowledge Discovery and Data Mining. Hyderabad: Springer, 2010: 21-24.
- [10] READ T R C, CRESSIE A C. Goodness of fit statistics for discrete multivariate data [M]. America: Springer, 1989: 4617-4578.
- [11] CHENG H, ZHOU Y, YU J X. Clustering large attributed graphs: a balance between structural and attribute similarities [J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2015; 5(2): 12.
- [12] SUCHANEK F M, KASNECI G, WEIKUM G. Yago: a core of semantic knowledge [C]//Proceedings of the 16th International Conference on World Wide Web. Banff: ACM, 2007: 679-706.

作者简介:

徐周波 女, (1976-), 博士, 教授. 研究方向为符号计算、智能规划与约束求解.

黄文文 男, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为图数据.

刘华东(通讯作者) 男, (1978-), 讲师. 研究方向为图数据表示、符号计算. E-mail: ldd@guet.edu.cn.

杨健 男, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为图数据挖掘.

(上接第 16 页)

- [8] KUMARI B, MAURYA A, PATTANAIK M, et al. An efficient algebraic codebook structure for CS-ACELP based speech codecs [C]//2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Delhi, India. IEEE, 2017: 1-6.
- [9] HAN K. A fast search method of algebraic codebook by reordering search sequence [C]//1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings. ICASSP99 (Cat. No. 99CH36258). Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1999: 21-24.
- [10] 张昕源, 高绍全, 姜汉钧, 等. 基于 G. 726 的语音无线采集芯片发射机基带电路设计 [J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(1): 31-35.
- ZHANG X Y, GAO S Q, JIANG H J, et al. Base-

band circuit design for wireless speech acquisition transmitter based on G. 726 coding [J]. Microelectronics & Computer, 2018, 35(1): 31-35.

作者简介:

周瑾 女, (1995-), 硕士研究生. 研究方向为语音信号处理、专用集成电路设计.

乔树山 男, (1981-), 研究员. 研究方向为人工智能、低功耗集成电路设计方法学等.

凌康 男, (1981-), 硕士. 研究方向为集成电路设计.

詹毅 男, (1973-), 博士, 高级工程师. 研究方向为语音信号处理.

蒋见花(通讯作者) 女, (1976-), 博士, 副研究员. 研究方向为大规模集成电路设计技术、混合信号电路设计、电路加固技术. E-mail: jiangjianhua@ime.ac.cn.