

УДК 621.396.662

*П. С. СМОРОДОВ*, канд. техн. наук

### **МОДИФИЦИРОВАННЫЙ РЕКУРРЕНТНЫЙ ПОИСК СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ**

---

Известен ряд задач, например, задача измерения больших расстояний, когда требуемая база используемых сложных сигналов должна быть очень большой (порядка 10 000 и более) при сравнительно малой полосе частот, занимаемой сигналом и при больших отношениях сигнал-шум в полосе сигнала [1]. В таких задачах устройства циклического и параллельно-последовательного поиска сложных сигналов оказываются уже малоэффективными. Лучшие результаты могут быть получены при использовании методов поиска, предполагающих посимвольный прием сложного сигнала.

Использование схем посимвольного приема в устройствах поиска отрицательно влияет на помехоустойчивость и положительно — на быстроту получения оценок. Поэтому основной задачей оптимизации структуры и параметров устройств, использующих методы посимвольного приема, является обеспечение минимального времени поиска при заданной вероятности успеха и определение границ, в которых еще возможно уменьшать время поиска за счет учета структурных особенностей сложных сигналов по

сравнению со временем их циклического и параллельно-последовательного поиска.

Одним из наиболее эффективных методов поиска сложных сигналов для больших отношений сигнал-шум является рекуррентный поиск с одной и двумя степенями обнаружения [2]. При этом правильность установки начальных условий генератора псевдослучайной последовательности (ПСП) каждый раз осуществляется путем корреляционной проверки на отрезке ПСП некоторой длительности. При уменьшении отношения сигнал-шум возрастает вероятность ошибки в символе ПСП, что ведет к увеличению числа ложных корреляционных проверок и, как следствие — к увеличению времени поиска.

Поиск на основе использования корректирующих свойств ПСП не требует корреляционных проверок и дает хорошие результаты при отношении сигнал-шум до — 6 дБ [3]. Однако при дальнейшем уменьшении отношения сигнал-шум для поддержания высокой вероятности успешного окончания поиска необходимо увеличивать длину обрабатываемого сегмента, что также приводит к возрастанию времени поиска.

Очевидно, что используя преимущества этих двух методов, можно реализовать достаточно эффективную процедуру поиска сложных сигналов при средних отношениях сигнал-шум.

Представим поисковую процедуру следующим образом. Осуществляется посимвольный прием  $n$  элементов ПСП, причем  $k < n < N$ , где  $k$  — степень образующего полинома,  $N = 2^k - 1$  — период ПСП. Принятый сегмент анализируется на отсутствие в нем ошибок. Если ошибок нет, осуществляется корреляционная проверка правильности синхронизма. Если корреляционная проверка дает положительный результат, поиск считается законченным, если отрицательный — поиск начинается с начала. Если принятый сегмент содержит ошибки, то он сдвигается на один разряд, принимается очередной элемент и анализ повторяется. Таким образом, поисковая процедура является двухэтапной. На первом этапе осуществляется проверка методом декодирования, и, если результат проверки положительный, на втором этапе осуществляется корреляционная проверка.

Для определения вероятностно-временных характеристик данного метода поиска поисковую процедуру представим в виде графа переходов (рис. 1). Состояние 5 соответствует успешному окончанию поиска, состояние 7 — ложному синхронизму. Производящая функция вероятности перехода из начального состояния в поглощающее, соответствующее успешному окончанию поиска, будет равна

$$H(s) = \frac{s^{n+1} p^n P_D}{1 - s(1 - p^n)(1 - P_{но}) - s^{n+1} [P_{но}(1 - p^n)(1 - P_F) + p^n(1 - P_D)]}, \quad (1)$$

где  $p$  — вероятность правильной оценки элемента ПСП;  $P_{но}$  — вероятность необнаружения ошибки в  $n$ -разрядном сегменте ПСП;  $P_D$  —

вероятность правильного обнаружения;  $P_F$  — вероятность ложной тревоги;  $l$  — длина корреляционного отрезка.

Конечную вероятность успешного окончания поиска найдем из выражения (1) при  $s=1$ :

$$P_K = \frac{p^n P_D}{p^n P_D + P_F P_{\text{но}} (1 - p^n)}. \quad (2)$$

Для определения закона распределения времени поиска представим  $H(s)$  в виде ряда

$$H(s) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^i s^{(n+l)(j+1)+i-j} \binom{i}{j} p^n P_D [(1 - p^n) (1 - P_{\text{но}})]^{i-j} \times \\ \times [P_{\text{но}} (1 - p^n) (1 - P_F) + p^n (1 - P_D)]^j,$$

откуда получим искомое распределение

$$P(q) = p^n P_D [1 - p^n P_D - P_{\text{но}} P_F (1 - p^n)]^q.$$

Тогда вероятность успешного завершения поиска за  $q$  попыток будет равна

$$P_q = \sum_{i=1}^q P(q) = p^n P_D \frac{1 - [1 - p^n P_D - P_{\text{но}} P_F (1 - p^n)]^{q+1}}{p^n P_D + P_{\text{но}} P_F (1 - p^n)}. \quad (3)$$

Если число попыток будет бесконечно большим, то выражение (3) переходит в (2). Для определения моментов распределения времени поиска найдем первую и вторую производные от производящей функции при  $s=1$ :

$$m_1 = \left[ \frac{\partial H(s)}{\partial s} \Big|_{s=1} \right] / P_K, \quad m_2 = \left[ \frac{\partial^2 H(s)}{\partial s^2} \Big|_{s=1} \right] / P_K.$$

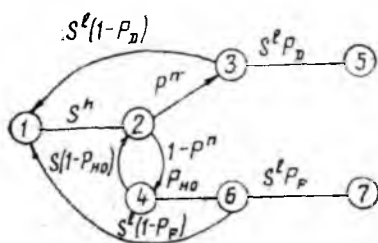


Рис. 1

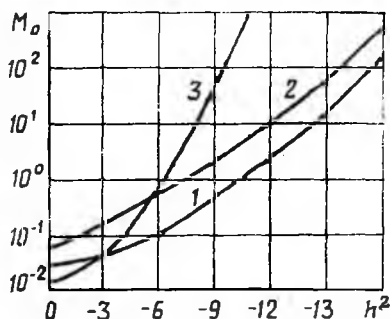


Рис. 2

Тогда математическое ожидание и дисперсия времени поиска будут равны [4]

$$M[L] = m_1 = \frac{(n+l) [p^n (1 - P_{\text{но}}) + P_{\text{но}}]}{p^n P_D + P_F P_{\text{но}} (1 - p^n)}; \quad (4)$$

$$D[L] = m_2 - m_1^2 + m_1 = \frac{P_D [p^n (1 - P_{\text{но}}) + P_{\text{но}}] (n+l)^2}{[p^n P_D + P_F P_{\text{но}} (1 - p^n)]^2}. \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) искомые величины выражены через число элементов ПСП, т. е. проведена нормировка относительно длительности единичного элемента сложного сигнала.

Анализ выражений (2) — (5) показывает, что для уменьшения времени поиска необходимо уменьшать число ложных корреляционных проверок. Это возможно, если  $n$  — разрядный сегмент имеет достаточно большое минимальное кодовое расстояние  $d$ . Однако для увеличения  $d$  необходимо увеличивать и длину принимаемого сегмента  $n$ , что приводит к увеличению времени поиска. Расчеты, проведенные для ПСП длиной 1023 элемента, показывают, что целесообразно величину  $n$  выбирать равной 15. В этом случае  $d=3$ , что позволяет сохранить вероятность необнаружения ошибки на достаточно небольшом уровне. При этом вероятность необнаружения ошибки определяется выражением [3]

$$P_{\text{но}} = 2^{-(n-k)} \sum_{i=d}^n \binom{i}{n} (1-\rho)^i \rho^{n-i}.$$

Вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги на этапе проверки будут равны [2]

$$P_D = 0,5 \{1 + \operatorname{erf} [(1-\rho) \sqrt{l \cdot h^2}]\},$$

$$P_F = 0,5 \{1 - \operatorname{erf} [\rho \sqrt{lh^2/(1+h^2)}]\},$$

где  $h^2$  — отношение сигнал-шум на входе;  $\rho$  — нормированный порог обнаружения;  $\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x \exp(-t^2) dt$  — функция ошибок.

Задача оптимизации параметров системы поиска сводится к нахождению значений двух параметров  $l$  и  $\rho$ , которые удовлетворяют заданной вероятности успешного завершения поиска (2) и минимизируют среднее время поиска (4) при фиксированной длине обрабатываемого сегмента  $n$  и отношении сигнал-шум. Эта задача, относящаяся к задачам нелинейного программирования, была решена методом наискорейшего спуска. На рис. 2 показан график зависимости величины  $M_0 = M[L]$  от отношения сигнал-шум при оптимальных значениях  $l$  и  $\rho$  и при  $P_k = 0,99$ ;  $n = 15$ ,  $k = 10$  для фазоманипулированных сложных сигналов длины 1023 элемента (кривая 1). Для сравнения приведена зависимость величины  $M_0$  от  $h^2$  для поиска с последовательной оценкой символов ПСП [2] (кривая 2) и для поиска с использованием корректирующих сегментов ПСП [3] (кривая 3). Анализ графиков показывает, что при  $h^2 > -3\text{дБ}$  предпочтителен поиск с использованием корректирующих свойств сегментов ПСП, а при дальнейшем уменьшении отношения сигнал-шум наилучшими характеристиками обладает модифицированный рекуррентный поиск.

Таким образом, рассмотренная процедура поиска достаточно эффективна в условиях, когда возможен поэлементный прием ПСП, проста в реализации и позволяет значительно сократить время поиска по сравнению с другими известными методами поиска.

**Список литературы:** 1. Диксон Р. К. Широкополосные системы. Пер. с англ. / Под ред. В. И. Журавлева. М., 1979. 302 с. 2. Журавлев В. И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. М., 1986. 240 с. 3. Смородов П. С. Поиск псевдослучайных сигналов на основе использования корректирующих свойств модулирующих последовательностей // Радиотехника. 1989. Вып. 91. С. 6—9. 4. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М., 1977. 487 с.

*Поступила в редколлегию 01.06.90*