

ISB - 6318 / 796 / 8-9
68

158

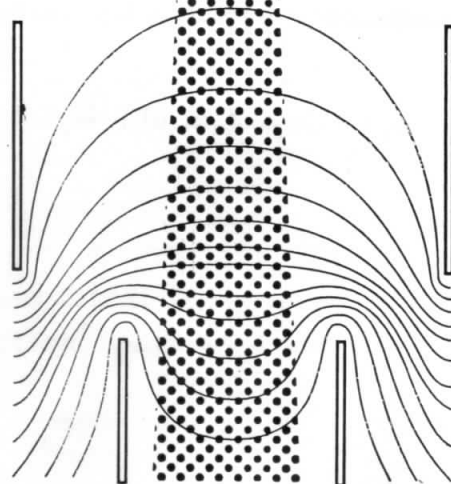
ISSN 0021-3454

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е



8-9

1996



10. Ростовцев Ю. Г., Шумилов К. А. Оценивание состояния развивающихся систем // Изв. вузов. Приборостроение. 1995. Т. 38, № 11—12. С. 5—8.
11. Ростовцев Ю. Г. Системный подход к преодолению неопределенности знаний на этапе обоснования решений // Там же. № 7—8. С. 5—10.
12. Любуа Д., Прад А. Теория возможностей: Приложение к представлению знаний в информатике. М.: Радио и связь. 1990. 287 с.

Рекомендована кафедрой
обработки информации

Поступила в редакцию
23. 05. 94 г.

УДК 621. 391

А. П. ТРИФОНОВ, С. В. ВЕТРОВ
Воронежский государственный университет

АДАПТИВНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ АНТЕННЫ

Предложена аппаратурная реализация адаптивного последовательного обнаружителя сигнала на выходе антенны с интерферометром Фабри — Перо.

В работе [1] предложена аппаратурная реализация адаптивного последовательного алгоритма обработки сигнала гравитационной антенны с гетеродинным способом приема. В работах [2, 3] показано, что последовательный алгоритм обнаружения позволяет заметно сократить требуемую длительность наблюдения. Однако для многих гипотетических источников непрерывного гравитационного излучения (ГИ), таких, как двойные звезды и пульсары, чувствительность антенны, реализующей гетеродинный способ приема, оказывается недостаточной [4]. Дальнейшее развитие гравитационно-волнового эксперимента связано с созданием лазерно-интерферометрических гравитационных антенн (ЛИГА), которые, возможно, позволят обеспечить необходимую чувствительность [4, 5]. Очевидно, что совершенствование техники эксперимента должно сопровождаться разработкой эффективных статистических алгоритмов обработки выходного сигнала ЛИГА.

Рассмотрим ЛИГА с интерферометром Фабри — Перо [4]. Накачка интерферометра осуществляется когерентным лазерным излучением мощностью P с длиной волны λ_e . Воздействие ГИ вызывает модуляцию интенсивности оптического излучения на выходе интерферометра, которое преобразуется в доступный для обработки электрический сигнал с помощью фотодетектора. Гипотетические источники непрерывного ГИ (пульсары, двойные звезды) излучают гармоническую гравитационную волну [4].

В результате на выходе фотодетектора наблюдается пуассоновский случайный процесс $\xi(t)$ с интенсивностью [4, 6]

$$\lambda_1(t, W_0, \psi_0) = \lambda' \rho_1(\delta) \{ 1 + \rho_2(\delta) \sqrt{W_0} U(\theta_0, \varphi_0) \cos[\omega_0 t - \psi_0] + \lambda_e \} \quad (1)$$

— при наличии ГИ,

$$\lambda_0(t) = \lambda' \rho(\delta) + \lambda_e \quad (2)$$

— при его отсутствии.

Здесь W_0 и ψ_0 — априори неизвестные значения плотности потока мощности и начальной фазы принимаемого ГИ, ω_0 — его частота;

$$\rho_1(\delta) = (1 - R)^2 / [(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)];$$

$$\rho_2(\delta) = RQ(1 - R) \sin \delta / [(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)];$$

$$U(\theta_0, \varphi_0) = \sin^2 \varphi_0 - \cos^2 \theta_0 \cos^2 \varphi_0,$$

$$\delta = 4\pi l / \lambda_e; \quad Q = 4\pi l / [\lambda_e(1 - R)]; \quad \lambda' = \eta P / (\hbar \omega_e); \quad B = \sqrt{8\pi G / c^3};$$

G — гравитационная постоянная; $\hbar$ — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; $\omega_e = 2\pi c / \lambda_e$ — частота лазерной накачки; R — показатель качества зеркал интерферометра; η — квантовая эффективность фотодетектора; θ_0, φ_0 — углы прихода ГИ в сферической системе координат, связанной с интерферометром; λ_e — интенсивность естественного дробового шума (темнового тока) фотодетектора [6].

Для реализации последовательного алгоритма обработки необходимо формировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОР) как функцию текущего времени наблюдения τ и параметров ГИ [7]. Согласно работе [8] логарифм ФОР может быть представлен в виде стохастического интеграла по пуассоновской мере

$$L(\tau, W, \psi) = \int_0^\tau \ln [\lambda_1(t, W, \psi) / \lambda_0(t)] d\xi(t) - \int_0^\tau [\lambda_1(t, W, \psi) - \lambda_0(t)] dt, \quad (3)$$

где W и ψ — возможные значения плотности потока мощности и начальной фазы ГИ.

В гравитационно-волновом эксперименте априорное распределение параметров W_0 и ψ_0 неизвестно. Поэтому для синтеза последовательного обнаружителя воспользуемся методом максимального правдоподобия [7, 9]. Прогнозируемые значения плотности потока мощности ГИ пульсаров весьма малы [4]. Поэтому разложим логарифм ФОР (3) в ряд по степеням $B\sqrt{W_0}/\omega_0$ и отбросим члены более высокого порядка малости, чем $B^2 W_0 / \omega_0^2 \leq 10^{-29}$. Максимизируя затем полученное выражение по W и ψ , находим решающую статистику максимального правдоподобия

$$u(\tau) = [X^2(\tau) + Y^2(\tau)] / \int_0^\tau d\xi(t), \quad (4)$$

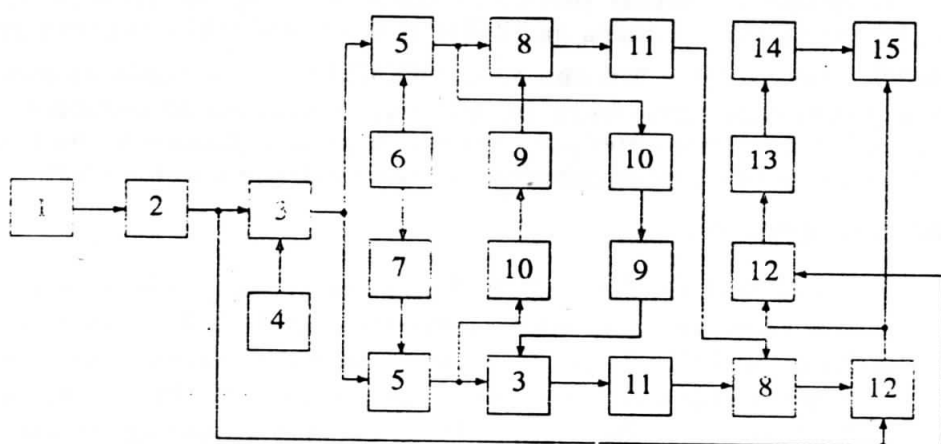
где

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} X(\tau) \\ Y(\tau) \end{Bmatrix} &= \int_0^\tau \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} (\omega_0 t) [d\xi(t) - \lambda' \rho_1(\delta)(1 + \varepsilon) dt] = \\ &= \xi_0(\tau) \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} (\omega_0 \tau) \pm \omega_0 \int_0^\tau \xi_0(t) \begin{Bmatrix} \sin \\ \cos \end{Bmatrix} (\omega_0 t) dt, \end{aligned}$$

$$\xi_0(\tau) = \xi(\tau) - \lambda' \rho_1(\delta)(1 + \varepsilon)\tau; \quad \varepsilon = \lambda' / [\lambda' \rho_1(\delta)]. \quad (5)$$

Аналогично работам [1—3] последовательную обработку целесообразно применять, начиная с некоторой фиксированной длительности наблюдения $\tau_0 > 0$. В интервале $[0, \tau_0]$ осуществляется предварительное накопление данных на выходе ЛИГА. Соответственно этому при $\tau \geq \tau_0$ необходимо сравнивать решающую статистику

стику (4) с порогами a и b . Если $u(\tau) \geq b$, то выносится решение о наличии ГИ, а если $u(\tau) \leq a$ — об отсутствии. Пороги a и b при этом выбираются из условия обеспечения требуемых значений вероятностей ошибок первого и второго рода [1, 7].



Для характерных в гравитационно-волновом эксперименте значений мощности накачки $P \approx 1$ Вт и квантовой эффективности фотодетектора $\eta = 0,3 \dots 1,0$ интенсивность пуассоновского потока фотоэлектронов $\lambda = 10^{17} \dots 10^{18} \text{ с}^{-1}$ [4]. Поэтому уже при $\tau_0 \geq 1$ квадратуры $X(\tau)$ и $Y(\tau)$ (5) можно с высокой точностью аппроксимировать реализациями гауссовских случайных процессов [6, 8]. Тогда условные вероятности ошибок обнаружения совпадают с приведенными в работе [1]. Отличие в том, что для ЛИГА в качестве отношения сигнал—шум (ОСШ) следует использовать величину

$$\hat{z}^2 = B^2 U^2(\theta_0, \varphi_0) \rho_1(\delta) \rho_2^2(\delta) \lambda' \tau_0 W_0 / [2\omega_0^2(1 + \varepsilon)]. \quad (6)$$

Аналогично работе [1] пороги a и b последовательного обнаружителя оказываются зависящими от ОСШ (6), которое определяется априори неизвестным значением W_0 . Поэтому предлагается адаптивный вариант выбора порогов. При этом для расчета порогов a и b вместо неизвестного ОСШ (6) следует использовать его оценку [1]. Заменяя в выражении (6) неизвестное истинное значение W_0 его оценкой максимального правдоподобия

$$\hat{W} = \arg \sup_{W'} \left[\sup_{\tau} L(\tau, W', \psi) \right] = 4(1 + \varepsilon)^2 \omega_0^2 u(\tau) \left[B^2 U^2(\theta_0, \varphi_0) \rho_2^2(\delta) \int_0^\tau d\xi(t) \right]^{-1},$$

находим требуемую оценку ОСШ

$$\hat{z}^2 = 2\lambda' \tau_0 (1 + \varepsilon) \rho_1(\delta) u(\tau) / \int_0^\tau d\xi(t). \quad (7)$$

На рисунке приведен один из вариантов аппаратной реализации адаптивного последовательного обнаружителя, синтезированного в соответствии с выражениями (4), (5) и (7). Здесь 1 — фотодетектор; 2 — счетчик импульсов (интегратор); 3 — вычитающее устройство; 4 и 6 — генераторы, формирующие напряжение $u_1(t) = \lambda' \rho_1(\delta)(1 + \varepsilon)t$ и $u_2(t) = \cos \omega_0 t$; 5 — перемножитель; 7 — фазовращатель, сдвигающий фазу на $\pi/2$; 8 — сумматор; 9 — интегратор; 10 и 13 — усилители с коэффициентом усиления $k_1 = \omega_c$ и $k_2 = 2\lambda' \tau_0 \rho_1(\delta)(1 + \varepsilon)$; 11 — квадратор; 12 —

делитель; 14 — вычислительное устройство, которое по оценке $\hat{z}^2(\tau)$ (7) определяет пороги обнаружителя в соответствии с формулами, приведенными в работе [1]; 15 — решающее устройство, которое выносит решение о наличии или отсутствии ГИ.

С целью проверки работоспособности и эффективности синтезированного обнаружителя выполнялось на ПЭВМ IBM PC 386/387 его статистическое моделирование. Установлено, что при малых ОСШ ($z^2 \leq 0,1$), характерных для гравитационно-волнового эксперимента [4, 6], последовательный алгоритм позволяет примерно вдвое сократить требуемую длительность наблюдения по сравнению с непоследовательными (однопороговыми) оптимальными алгоритмами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трифонов А. П., Ветров С. В. Адаптивный последовательный обнаружитель гравитационного излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 1990. Т. 33. № 11. С. 14—17.
2. Трифонов А. П., Ветров С. В. Эффективность последовательного обнаружения непрерывного гравитационного излучения // Радиотехника. 1989. № 2. С. 62—65.
3. Трифонов А. П., Ветров С. В. Последовательный обнаружитель непрерывного гравитационного излучения с убывающей частотой // Там же. 1990. № 11. С. 26—29.
4. Бичак И., Руденко В. Н. Гравитационные волны в ОТО и проблема их обнаружения. М.: Изд-во МГУ, 1987.
5. Гришук Л. Н. Гравитационно-волновая астрономия // УФН. 1989. Т. 61, вып. 2. С. 297—322.
6. Курикса А. А. Квантовая оптика и оптическая локация. М.: Сов. радио. 1973.
7. Сосулин Ю. Г., Фишман М. М. Теория последовательных решений и ее применение М.: Радио и связь, 1987.
8. Большаков И. А., Ракошиц В. С. Прикладная теория случайных потоков. М.: Сов. радио. 1978.
9. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986.

Рекомендована кафедрой
радиофизики

Поступила в редакцию
10. 02. 95 г.

05.99

УДК 519. 21

Д. В. КИРИЧЕНКО, Д. П. РАКЧЕЕВ

Военная инженерно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург

ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМИРОВАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматривается плотность распределения случайной величины, являющейся результатом нормирования одного измерения относительно другого, и приводится расчет вероятности селекции тепловых целей с помощью двухзонального оптико-электронного средства.

При обработке результатов измерений, как правило, принимается гипотеза о нормальности законов распределения измеренных величин, не противоречащая предельным теоремам теории вероятностей. Однако часто при зависимости нескольких измеряемых величин от некоторого параметра необходимо получить