

УДК 53:51; 538.56; 530.145

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГВ-АНТЕННУ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

С. И. Бабиченко, В. Н. Руденко

(кафедра физики колебаний)

Представлены результаты численного эксперимента, в котором имитировалось воздействие ГВ-всплеска на гравитационную антенну с параметрическим преобразователем. Операция восстановления воздействия проводилась методом минимизации функционала Тихонова [1].

Эквивалентная модель антенны изображена на рис. 1. Процессы в такой системе описываются уравнениями

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} + 2\delta_{\mu}\dot{\xi} + \omega_{\mu}^2\xi - \lambda\omega_{\mu}^2\eta^2 &= f(t), \\ \ddot{\eta} + 2\delta_c\dot{\eta} + \omega_c^2\eta(1 - \xi) &= \frac{E\omega_c^2}{E_1} + \frac{E_{fl}\omega_c^2}{E_1} + \frac{Mj^6}{R_{\Phi}C_{\Phi}I_0}, \end{aligned}$$

где $\xi = x/d$ — координата гравитационного детектора; $\eta = q/q_0$ — координата датчика; E_{fl} — флуктуационная ЭДС контура; I^6 — высокочастотная компонента тока детектора. Ток в цепи детектора под действием напряжения U_{μ} равен

$$I = I_0 \exp(\alpha U_g) - I_0 + I_{др} = C_{\Phi}\dot{U} + U/R_{\Phi}; \quad E = U_N \cos \omega_{\mu}t,$$

где $I_{др}$ — шум детектора. Внешнее воздействие $f(t)$ выбиралось в виде, типичном для импульсных релятивистских источников. Математическая процедура решения обратной задачи описана в [2]. Возможность восстановления формы сигнала по отклику на выходе датчика исследовалась при различных уровнях шума. Под восстановлением подразумевалась не только возможность выделения сигнала, но также возможность удовлетворительной аналитической аппроксимации его формы хотя бы без указания численных параметров.

Исследовались возможные источники шума в регистрирующих элементах и зависимость качества восстановления от спектральной окраски шума. Выбиралось оптимальное значение амплитуды накачки (U_N)_{опт}, соответствующее максимальной амплитуде отклика.

Количественным критерием качества восстановления послужила оценка среднеквадратичных ошибок восстановления σ^2 для случая теплового (E_{fl}), дробового ($I_{др}$) и «белого» (Б) (имитирующего входной шум последующих каскадов) шумов. Сравнивались оценки σ^2 при различных фиксированных значениях выходного отношения сигнал/шум по мощности μ^2 . Оказалось, что $\sigma_6^2 < \sigma_{fl}^2 < \sigma_{др}^2$ при различных $\mu^2 \gg 1$; для $\mu^2 \ll 1$ интервалы возможных среднеквадратичных ошибок восстановления перекрываются и различия стираются.

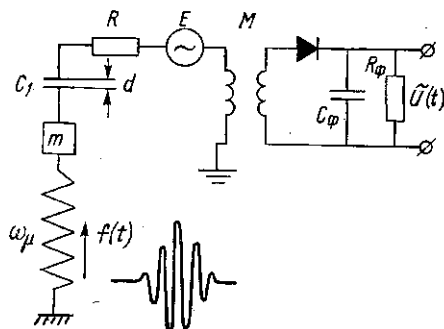


Рис. 1. Модель гравитационной антенны с параметрическим преобразователем

Использование параметрического преобразователя вместо пассивного RC -датчика [2] позволило получить более высокие значения чувствительности антенны. Коэффициент передачи возрос в $(\omega_H/\omega_n)^{1/2}$ раз. Поэтому при одном и том же внешнем воздействии и фиксированном уровне шума условия приема и восстановления в случае параметрического датчика лучше.

Существуют дополнительные резервы повышения чувствительности параметрического датчика, связанные с эффектом динамического демпфирования (использование провала в спектре шума на частоте ω_n) [3]. Улучшение разрешающей способности в эксперименте возможно либо за счет дополнительного сужения полосы приема Δ , либо путем увеличения амплитуды подводимой накачки U_N . Динамика изменения мощности шума контура P_T , мощности сигнала P_C и отношения сигнал/шум μ^2 на выходе датчика от Δ следующая. Сужение полосы приема Δ при $U_N = (U_N)_{opt}$ приводит к экспоненциальному росту отношения μ^2 , в то время как мощности сигнала P_C и шума P_T падают. Очевидно, что чрезмерное сужение полосы пропускания системы ослабляет влияние шума контура независимо от его уровня, однако при этом сильно искажается сам сигнал. Восстановленный сигнал оказывается в этом случае более узкополосным, чем истинный, т. е. восстанавливается лишь часть его спектра.

Рассмотрим следствия увеличения амплитуды подводимой накачки U_N при различных полосах приема на фоне шума датчика. На рис. 2

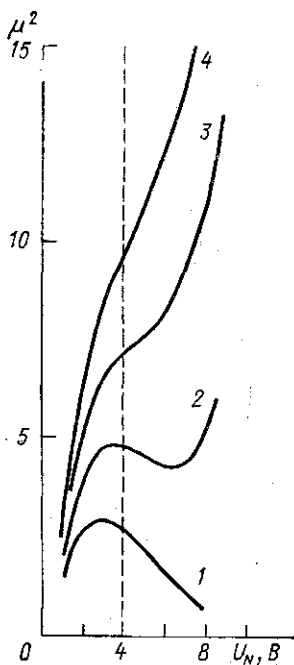


Рис. 2. Зависимость величины отношения сигнал/шум, рассчитанного по выходной мощности $\bar{U}_\Delta(t)$ в различных полосах приема от величины амплитуды накачки U_N

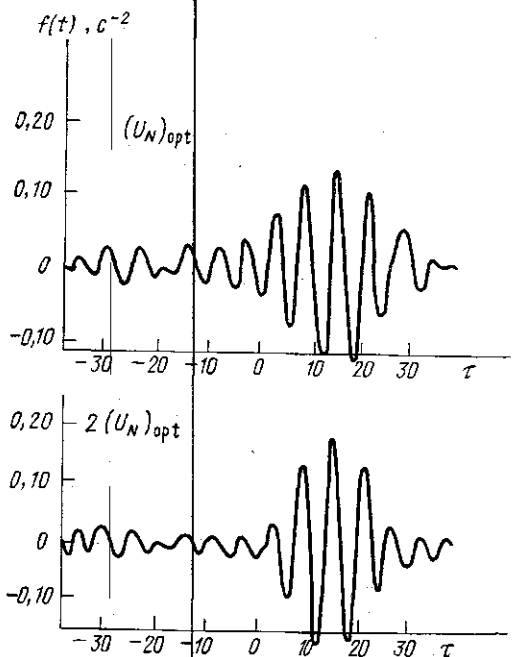


Рис. 3. Использование эффекта динамического демпфирования. Форма восстановленного сигнала при различных амплитудах накачки U_N ; $\tau = \omega_n t$

представлена зависимость отношения сигнал/шум μ^2 (по выходной мощности сигнала $\bar{U}_\Delta(t)$) от величины амплитуды накачки U_N для шума контура P_T в различных полосах приема: $\Delta_i = 4\pi/(\tau_c \cdot i)$ для $i=1, 2, 4$; $\Delta_3 = \sqrt{2}\pi/\tau_c$, где $\tau_c = \omega_d T_c$ — безразмерная длительность сигнала, для $i=3$. Увеличение амплитуды накачки U_N до значений, превышающих оптимальное $(U_N)_{\text{opt}}$, начиная с некоторой полосы приема Δ , согласованной с полосой сигнала, приводит к быстрому росту отношения сигнал/шум μ^2 и соответственно к улучшению разрешающей способности параметрической антенны. Такое улучшение является следствием эффекта динамического демпфирования шума датчика. Качество восстановления при этом существенно повышается, однако не следует забывать, что увеличение напряжения накачки ограничено требованием динамической устойчивости системы, а также напряжением пробоя емкости. Практическая реализация возможностей для такого улучшения разрешающей способности связана с уровнем электрических флуктуаций последующих каскадов. Рис. 3 иллюстрирует улучшение качества восстановления сигнала с ростом накачки на фоне теплового шума датчика (уровень сигнала выбирался равным уровню шума E_n) и «белого» шума в полосе приема Δ_3 при $\mu^2=5$. Однако уже при $\mu^2 \leq 0,9$ улучшение качества восстановления сигнала для накачки, в 2 раза превышающей оптимальную, не наблюдается. Существует некоторое предельное значение амплитуды накачки, при котором восстановление еще возможно. Ширина области параметров $U_N/(U_N)_{\text{opt}}$, μ^2 , в которой возможно восстановление формы сигнала, уменьшается при $\mu^2 \rightarrow 1$ и увеличивается при $\mu^2 \gg 1$. Это связано с падением уровня выходного отклика для значений $U_N > (U_N)_{\text{opt}}$ ниже уровня «белого» шума. Однако незначительное увеличение связи M при завышенных значениях амплитуды накачки позволяет сохранить сигнал на фиксированном уровне и приводит к расширению рассматриваемой области для значений $\mu^2 \rightarrow 1$. При этом предполагается выполнение условия малости обратного влияния цепи детектора на колебания в контуре.

Таким образом, для антенны с параметрическим датчиком предложенная процедура обработки выходных данных допускает удовлетворительное восстановление формы ГВ-всплеска и приводит к повышению разрешающей способности приемной системы.

Дополнительное повышение точности восстановления достигается использованием двухэтапной адаптивной процедуры, состоящей из решения обратной задачи методом регуляризации и восстановления параметров по минимуму среднеквадратичной ошибки на выходе [2]. Применение второго этапа позволяет существенно снизить относительную ошибку восстановления амплитуды сигнала (в 2,6 раза при $\mu^2=1$).

Используемая методика может быть применена в широком классе экспериментов с пробными телами, связанных с регистрацией слабых воздействий на пробный макроскопический осциллятор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983, с. 44.
 [2] Babichenko S. I., Rudenko V. N. In: Proc. of GR-10 Conf. Roma, 1983, 2, p. 1210. [3] Гусев А. В., Руденко В. Н. Радиотехн. и электроника, 1976, 21, с. 1865.