

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН ОГИБАЮЩЕЙ В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С ВАРИКАПАМИ

К.И. Воляк, В.Ф. Марченко, А.М. Стрельцов

Экспериментально показано, что в дискретной электромагнитной линии передачи со специально подобранной дисперсией в зависимости от выбора частоты наблюдаются оба типа солитонов огибающей: солитоны пучности и "темные" солитоны.

Динамика модулированной волны $u = (1/2)Ve^{i(\omega_0 t - k_0 x)}$ + к.с. в среде с дисперсией и кубической нелинейностью описывается нелинейным уравнением Шредингера /1/:

$$i \frac{\partial V}{\partial \tau} + N \frac{\partial^2 V}{\partial \xi^2} + P|V|^2 V = 0, \quad (1)$$

где V — амплитуда волны; τ_0 — "медленное" время; $\xi = x - v_g t$; v_g — групповая скорость; $N = - (1/2) \partial^2 \omega / \partial k^2 |_{k=k_0}$ — коэффициент дисперсии; P — коэффициент нелинейности. В дискретной электромагнитной линии передачи типа фильтра нижних частот с нелинейными емкостями, заряд Q на которых может быть аппроксимирован функцией переменного напряжения и вида

$$Q = C_0 u (1 + a u^2), \quad (2)$$

коэффициент нелинейности имеет вид:

$$P = - (3/8) a \omega, \quad a > 0. \quad (3)$$

До сих пор эксперименты с квазистационарными модулированными волнами проводились в средах, где выполнялось либо условие $NP > 0$ и наблюдались солитоны пучности /2/, либо $NP < 0$ и наблюдались солитоны впадины — "темные" солитоны /3/. В настоящей работе описаны эксперименты в линии передачи, в которой в зависимости от выбора несущей частоты ω_0 возможно наблюдение солитонов обоих типов.

Линия, эквивалентная схема и дисперсионная характеристика которой показаны на рис. 1, содержала 60 звеньев. В каждое звено была включена встречно-параллельно пара барьерных варикапов, находящихся при одинаковых (по модулю) постоянных напряжениях смещения (цепи смещения не показаны). Как известно /4/, вольт-фарадная характеристика емкости такого звена не содержит четных степеней u и близка к виду (2).

Анализ дисперсионного соотношения линии

$$\omega^2 = (4 \sin^2 \frac{k}{2}) / LC_0 (1 + 4 \frac{C_1}{C_0} \sin^2 k) \quad (4)$$

показывает, что в области частот $4 \text{ МГц} \leq \omega/2\pi < 5,5 \text{ МГц}$, где $NP > 0$, должны наблюдаться квазисолитоны пучности, а при $5,6 \text{ МГц} \leq \omega/2\pi \leq 6,5 \text{ МГц}$, где $NP < 0$ — "темные" квазисолитоны огибающей.

В эксперименте на вход линии подавалась модулированная волна, близкая по форме к расчетной стационарной. Образование солитонов происходило на первых 10–15 ячейках, а затем они несколько деформировались из-за потерь в линии.

Для формирования солитона пучности на вход линии подавался радиоимпульс трапецеидальной формы на частоте $f_0 = \omega_0/2\pi = 4,8 \text{ МГц}$ с длительностью $t_u = 2 \text{ мкс}$. Осциллограмма квазисолитона в линии представлена на рис. 2а. Расчетная форма такого солитона описывается гиперболическим секансом /5/:

$$V = V_0 \operatorname{sch} [V_0 \sqrt{\frac{P}{2N}} v_g t],$$

где V_0 – амплитуда импульса.

Для количественного сравнения наблюдаемой и расчетной форм импульсов численные значения величин N и v_g определялись с помощью зависимости (4), а коэффициента P – из (3). Регистрируемая в эксперименте форма огибающей близка к расчетной с точностью до 15%. Наличие осциллирующих "хвостов" объясняется влиянием дисперсии более высокого порядка, не учитываемой в уравнении (1). С соответствием с известными представлениями /5/ экспериментальная проверка показала, что скорость квазисолитонов пучности не зависит от их амплитуды и приблизительно равна групповой скорости v_g , определяемой из (4).

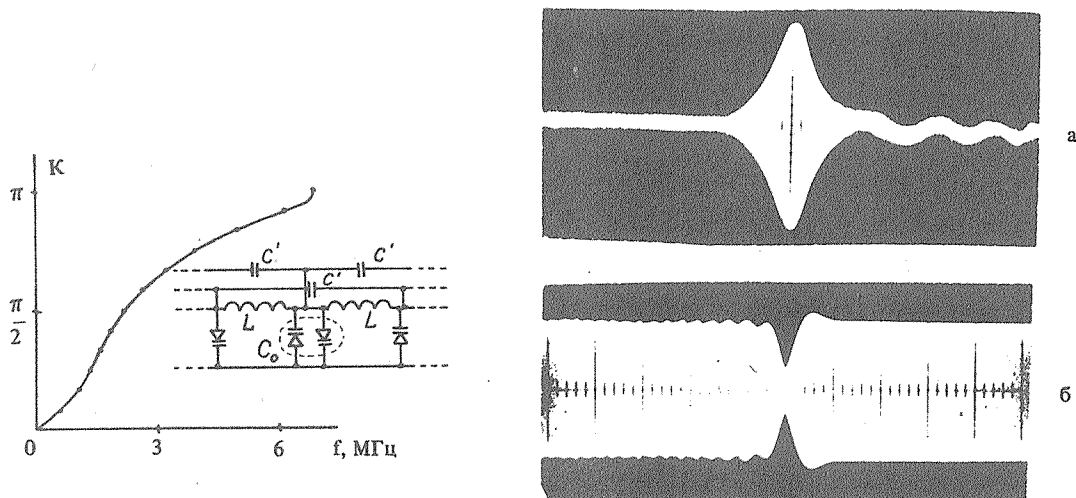


Рис. 1. Эквивалентная схема и дисперсионная характеристика линии ($L = 10$ мкГн, $C_0 = 315$ пФ, $C_1 = 210$ пФ); K – набег фазы на ячейку.

Рис. 2. Осциллограммы на выходе линии солитона пучности (а) при $V_0 = 2$ В, $t_u = 2$ мкс и "темного" солитона (б) при $V_0 = 1,7$ В, $V_1 = 0,3$ В.

Для наблюдения "темного" квазисолитона на вход линии подавалось гармоническое напряжение с частотой $f_0 = 6,5$ МГц, огибающая которого имела впадину, сформированную одним периодом синусоиды с частотой $F = 1$ МГц. Форма "темного" солитона описывается следующим выражением /5/:

$$\rho = \rho_0 - (\rho_0 - \rho_1) \operatorname{sch}^2 \left\{ [-P(\rho_0 - \rho_1)/2N]^{1/2} (v_g + W) t \right\},$$

где $\rho = V^2$; $\rho_0 = V_0^2$; $\rho_1 = V_1^2$; V_0 – амплитуда напряжения несущей частоты; V_1 – значение напряжения на "дне" впадины; W – поправка к групповой скорости.

Расчетная и наблюдаемая (рис. 2б) формы "темного" квазисолитона заметно отличались, что обусловлено близостью несущей частоты к границе полосы пропускания линии, где существенную роль играют потери и высокочастотная дисперсия, не учитываемые уравнением Шредингера (1). Как показано в /5/, W пропорционально V_1 :

$$W = \sqrt{-2NP} V_1,$$

что и было зафиксировано экспериментально, хотя измеренный коэффициент пропорциональности оказался более высоким. В то же время скорость солитона впадины действительно не зависела от напряжения V_0 .

Таким образом, в линии со специально выбранной дисперсией наблюдаются квазисолитоны огибающей обоих типов. Следует отметить, что дисперсия линии, исключая области, прилегающие к $\omega = 0$ и $\omega = \omega_c$, близка к дисперсии гравитационно-капиллярных волн на поверхности воды /6/, что указывает на возможность существования наблюдаемых стационарных пакетов для поверхностных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korpel A., Banarjee A. Proc. IEEE, 72, 1109 (1984).
2. Fukushima K., Wadati M., Narahara Y. J. Phys. Soc. Jap., 49, 1593 (1980).
3. Muroya K., Saitoh N., Watanabe S. J. Phys. Soc. Jap., 51, 1024 (1982).
4. Берман Л. С. Введение в физику варикапов. Л., Наука, 1968.
5. Карпман В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М., Наука, 1973.
6. Воляк К. И. и др. Препринт ИОФАН СССР № 329, 1986.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 7 января 1987 г.