

сценарным анализом, применения разработанных правовых актов [6, 7].

Литература:

1. Информационное обеспечение систем организационного управления (теоретические основы). В 3-х частях. Ч. 1. Методологические основы организационного управления. / Под ред. Е.А. Микрина и В.В. Кульбы. – М.: Физматлит, 2011. – 464 с.

2. *Винер Н.* Кибернетика и общество. – М.: «Иностранная литература», 1958. – 200 с.

3. *Винер Н.* Кибернетика или Управление и связь в животном и машине. 2-е изд. – М.: Советское радио, 1968. – 201 с.

4. *Копылов В.А.* Информация как объект правового регулирования // НТИ. – Сер.1. – 1996. – № 8.

5. *Соколова О.И.* Понятие неопределенности в неклассической науке и философии: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата философских наук. – Нижний Новгород, 2020. – 26 с.

6. Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2-х кн. / Под ред. В.Л. Шульца, В.В. Кульбы. – М.: Наука, 2012. – Кн. 1 – 304 с., кн. 2 – 358 с.

7. *Шульц В.Л., Кульба В.В., Шелков А.Б.* Аудит информационной безопасности автоматизированных систем управления // Тренды и управление. – 2014. – № 4. – С. 319-334.

DOI: 10.25728/iccss.2022.93.75.010

Еременко В.А., Манаенкова Н.И.

**К вопросу безопасности радиозондирования ионосферы
мощными волновыми пучками**

Аннотация: Рассмотрена задача нелинейного взаимодействия волна – ионосфера в условиях пороговой нелинейности. Приведено обоснование существования сосредоточенных волновых полей в этих условиях. Показано, что при определенном соотношении параметров возможно значительное увеличение интенсивности радиоизлучения.

Ключевые слова: распространение радиоволн; нелинейные волны; взаимодействие солитонов; пороговая нелинейность

Введение

Необходимость мониторинга ионосферной плазмы для нужд радиосвязи, радиолокации, навигации и прочих целей определяет развитие методов диагностики ионосферы, в том числе радиотехническими средствами. В современном мире процедура радиозондирования ионосферы является достаточно рутинной. При этом мощность радиоизлучения постоянно растет, что позволяет совершенствовать средства диагностики и расширяет диапазон наблюдаемых параметров. Однако увеличение мощности радиоизлучения может приводить как к положительным, так и отрицательным последствиям. Ионосферная плазма является достаточно разреженной средой. Длина свободного пробега электронов в этой среде относительно большая. В условиях электромагнитного поля электрон успевает получить значительную энергию за время одного пробега. Вследствие этого, диэлектрическая проницаемость окружающей среды становится зависимой от интенсивности волнового поля. Возникающие таким образом нелинейные возмущения ионосферной плазмы приводят к эффектам самофокусировки волнового поля. Теоретические исследования эффектов разогрева ионосферной плазмы мощным радиоизлучением начались довольно давно [1]. Экспериментальное подтверждение взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой при наклонном распространении дало дополнительный импульс исследованиям по этой тематике [2, 3]. Обычно для описания нелинейных волн используется так называемая Керровская модель нелинейности, – в которой нелинейное возмущение диэлектрической проницаемости пропорционально квадрату модуля амплитуды волны. В рамках этой модели показано существование сосредоточенных волновых полей – солитонов, являющихся очень удобным инструментом зондирования окружающей среды. Но достаточно очевидны и определенные ограничения модели. В реальности нелинейные эффекты не могут возникнуть при малой мощности излучения. Только когда амплитуда волны превысит некоторое пороговое значение, происходит «пробой» среды и возникает зависимость возмущения диэлектрической проницаемости от амплитуды волнового поля.

1. Постановка задачи

Рассмотрим типичную картину распространения радиоволн в ближайшем околоземном пространстве. В области фокусировки лучей интенсивность сигнала заметно увеличивается, следовательно, возможно нелинейное взаимодействие радиоволны с ионосферой [3].

Для описания волнового поля в этой малой области, воспользуемся уравнением Гельмгольца для амплитуды волнового поля

$$\Delta u + k^2 \cdot \varepsilon \cdot u = 0, \quad (1)$$

где k – волновое число и ε – диэлектрическая проницаемость.

При высокой интенсивности излученного сигнала диэлектрическая проницаемость становится зависимой от амплитуды волны и тогда для описания распространения радиоволн потребуется решать нелинейную задачу.

Будем рассматривать распространение узкого коротковолнового пучка. Построим решение уравнения Гельмгольца, сосредоточенное в малой окрестности лучевой траектории. В этой окрестности введем ортогональную систему координат: x – длина дуги траектории; y – расстояние вдоль направления, ортогонального лучу. Представим комплексную функцию u в виде: $u = v \cdot \exp(ik\psi)$, где v и ψ – действительные функции, и перейдя к безразмерным переменным $\xi = kx$, $\eta = ky$, получим в главном приближении типичную задачу нелинейного распространения радиоволн [4].

$$\frac{d^2 v}{d\eta^2} = q^2 v - (1 + \varepsilon_n(v^2))v, \quad \text{где } q = \frac{d\psi}{d\xi} \text{ – безразмерное}$$

волновое число, $\varepsilon = 1 + \varepsilon_n(v^2)$. Первый интеграл этого уравнения

$$\text{имеет вид: } F(v^2) = \int_0^{v^2} \varepsilon_n(t) dt, \quad \lambda^2 = q^2 - 1. \text{ Это уравнение}$$

при $E = 0$ предполагает существование сосредоточенных волн, при

условии, что уравнение $F(t) - \lambda^2 t = 0$ имеет корни $t = 0$ и $t = t_0 > 0$ [4].

2. Пороговая нелинейность

Рассмотрим далее модель распространения волны в условиях пороговой нелинейности, считая, что нелинейные эффекты возникает только для волн, интенсивность которых превышает некоторое пороговое значение [5]. Нелинейное возмущение диэлектрической проницаемости в этом случае может быть представлено формулой

$$\varepsilon_n(v^2) = \alpha v^2 \cdot \theta(v^2 - A^2), \quad (2)$$

где A - пороговое значение, $\theta(x)$ - функция Хэвисайда,

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases}.$$

В этом случае функция $F(v^2)$ имеет вид

$$F(v^2) = \int_0^{v^2} \varepsilon_n(t) dt = \frac{\alpha}{2} (v^4 - A^4) \cdot \theta(v^2 - A^2) \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что и в этом случае уравнение $F(t) - \lambda^2 t = 0$ имеет простые корни $t = 0$ и $t = t_0 > 0$, что гарантирует существование сосредоточенного решения - солитона. Эти локализованные волновые поля в среде с пороговой нелинейностью очень похожи на обычные керровские солитоны, но пучок – более узкий в центре и имеет «длинные хвосты». Но есть одна принципиальная особенность – зависимость эффективной ширины волнового пучка от его амплитуды. Как известно эффективная ширина «стандартного» (керровского) солитона обратно пропорциональна его амплитуде [5]. Для «порогового» солитона

(сосредоточенного волнового пучка в условиях пороговой нелинейности) ситуация принципиально другая. Зависимость эффективной ширины солитона от относительной амплитуды ν / A приведена на рисунке 1. Видно, что при превышении величины ν / A некоторого критического значения (порядка $5/3$) характер зависимости заметно меняется.

Взаимодействие волновых пучков в средах с пороговой нелинейностью может значительно отличаться от взаимодействия стандартных солитонов в среде с керровской нелинейностью. Если «стандартные» солитоны расходятся после взаимодействия без изменения амплитуды [5], то «пороговые» солитоны, при соотношении ν / A порядка $5/3$, могут «слипаться» в единый конгломерат повышенной интенсивности [6]. То есть, распространение мощного радиоизлучения в ионосфере в условиях пороговой нелинейности может сопровождаться заметным увеличением амплитуды электромагнитного излучения.

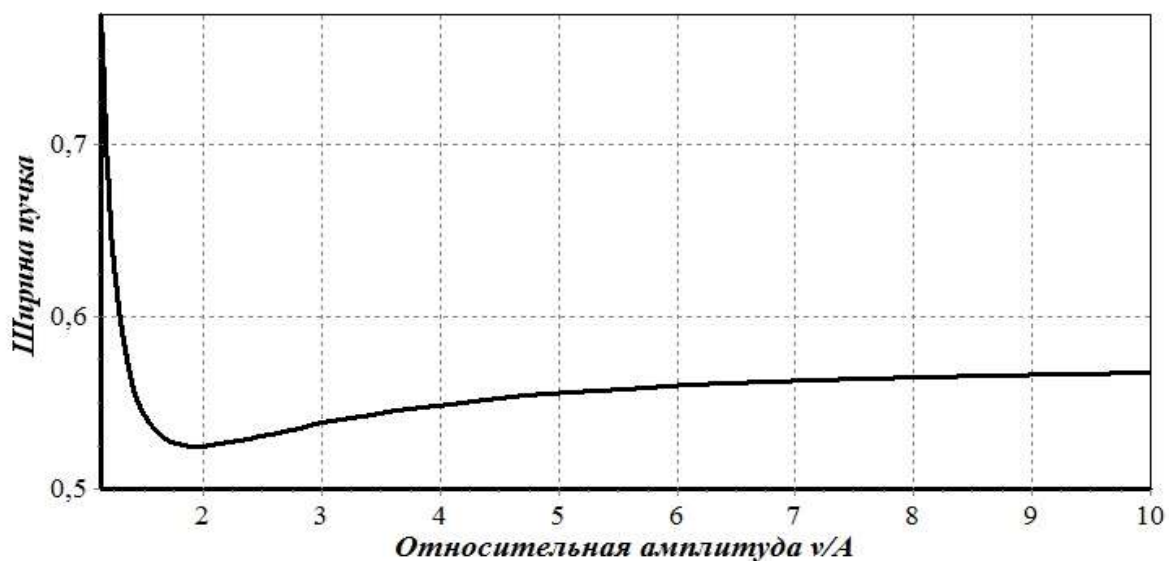


Рисунок 1 – Зависимость ширины пучка от отношения его амплитуды к величине порога нелинейности

2. Выводы

Легко видеть, что, для случая пороговой нелинейности существуют уединенные волны, – сосредоточенные решения

соответствующих волновых уравнений. Если не представляется возможным выписать аналитические выражения для этих решений, они могут быть построены путем компьютерного моделирования. Хотя эти волны подобны керровским солитонам, их взаимодействие, при определенном соотношении параметров, может принципиально отличаться от стандартного взаимодействия солитонов. Таким образом, модель пороговой нелинейности позволяет выявить в среде распространения сигнала настолько заметные изменения, которые могут оказаться опасными для широкого круга радиотехнических систем.

Литература:

1. Гинзбург В.Л., Гуревич А.В. Нелинейные явления в плазме, происходящие в переменном электромагнитном поле // Успехи физических наук. – 1960. – Т. 70. – С. 201-246.

2. *Bochkarev G.S., Eremenko V.A., Lobachevsky L.A., Ljannoy B.E., Migulin V.V., Cherkashin Yu.N.* Non-linear interaction of decameter radio waves at close frequencies on oblique propagation // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1982. – V.44. № 12. – P.1137-1141.

3. Бочкарев Г.С., Еременко В.А., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е., Мигулин В.В., Черкашин Ю.Н. Моделирование воздействия мощной волны на ионосферу при наклонном падении // Геомагнетизм и аэрономия. – 1980. – Т. 20. – С. 848-853.

4. Еременко В.А., Манаенкова Н.И. Влияние типа нелинейности на существование сосредоточенных волн // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – №6. – С. 49-54.

5. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике. – Москва: Мир, 1989. – 323 с.

6. Еременко В.А., Манаенкова Н.И. О взаимодействии солитонов в средах с насыщающейся и пороговой нелинейностью / Распространение радиоволн: труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах. Т. 2. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. – С. 505-508.