УДК 621.396

РАБОТЫ ЛАБОРАТОРИИ ДИФРАКЦИИ ИЗМИРАН

А. В. Попов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Даётся обзор работ, выполненных в лаборатории дифракции ИЗМИРАН за время, прошедшее с момента выхода предыдущего юбилейного сборника ИЗМИРАН в 1989 г. Наряду с задачами ионосферного распространения радиоволн рассматриваются фундаментальные проблемы теории дифракции, развитие метода параболического уравнения и вопросы подповерхностного радиозондирования.

Ключевые слова: дифракция, распространение радиоволн, физическая оптика, подповерхностное зондирование.

ВВЕДЕНИЕ

В 1989 г. созданная Ю. Н. Черкашиным лаборатория дифракции радиоволн в ионосфере была преобразована в отдел распространения радиоволн в ионосфере, состоящий из лаборатории дифракции, сохранившей прежнее название (заведующий А. В. Попов), лаборатории моделирования волновых полей в ионосфере (И. В. Крашенинников), сектора нелинейных волновых процессов (Ю. Н. Черкашин) и сектора широкополосного радиозондирования (В. В. Копейкин). В этом кратком обзоре мы коснёмся некоторых работ, выполненных за прошедшую четверть века в лаборатории дифракции (используем это сокращённое название, поскольку тематика исследований выходит за рамки ионосферного распространения радиоволн и включает фундаментальные проблемы дифракции, задачи оптической связи, рентгеновской оптики и подповерхностного зондирования).

1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ГЛОБАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Теория распространения радиоволн в горизонтально-неоднородной ионосфере, основанная на идеях адиабатического инварианта [Гуревич, Цедилина, 1979] и метода плавных возмущений [Попов, 1986], была создана в ИЗМИРАН в 70–80-х гг. прошлого столетия и описана в работах А. В. Гуревича, Е. Е. Цедилиной, В. А. Баранова и автора обзора (см. [Попов и др., 1989]). Дальнейшее развитие этого направления связано с решением задач прогноза дальнего распространения декаметровых радиоволн, диагностики глобально-неоднородной ионосферы, загоризонтной радиолокации и нелинейного взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой.

Попов Алексей Владимирович — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, popov@izmiran.ru

Для понимания механизмов дальнего распространения коротких радиоволн оказалось полезным дополнить традиционный метод построения лучевых траекторий расчётом эволюции узких волновых пучков в неоднородном канале Земля-ионосфера. Удобным средством такого анализа является аналитический аппарат гауссовых пучков, параметры которых легко находятся из траекторных расчётов [Baranov et al., 1992]. Теория гауссовых пучков позволяет учесть эффекты рефракции и дифракции, даёт оценку амплитуды сигнала и открывает возможность управления его фокусировкой (рис. 1).

В работах О. П. Коломийцева с соавторами [Егоров и др., 1999; Коломийцев и др., 2003] исследовались эффекты, связанные с расслоением F-области ионосферы, образованием «ионосферных дыр» и аномальными модами распространения радиоволн, наблюдающимися в низкоширотной ионосфере (рис. 2).

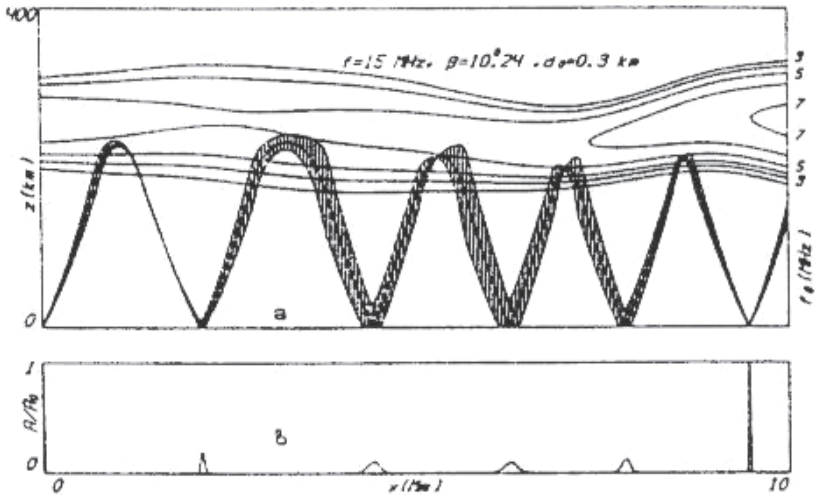


Рис. 1. Эволюция гауссова пучка в неоднородном канале Земля-ионосфера (ширина пучка и фактор фокусировки) [Baranov et al., 1992]

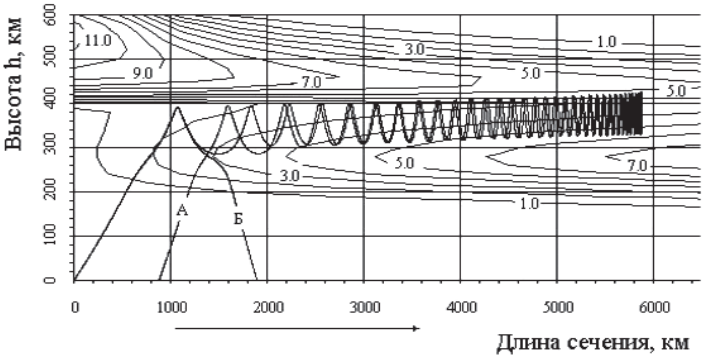


Рис. 2. Пример возвратно-наклонного распространения радиоволн в экваториальной ионосфере с аномальной задержкой сигнала [Коломийцев и др., 2003]

Метод плавных возмущений существенно упрощает расчёты траекторий распространения и характеристик дальних радиосигналов. В сотрудничестве с РИ НАНУ (Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины) были исследованы доплеровские сдвиги частоты на сверхдальних радиотрассах и разработаны принципы многопозиционной доплеровской диагностики крупномасштабных динамических процессов в глобально-неоднородной ионосфере [Зализовский и др., 2007] (рис. 3).

В сотрудничестве с Центром космических исследований Польской Академии наук (Space Research Centre, Polish Academy of Sciences, Wroclaw) исследовались проблемы сверхширокополосного импульсного зондирования ионосферы [Popov, Ciarkowski, 2009] и механизмы наклонного распространения мощного КВ-радиоизлучения [Егоров и др., 2012]. С помощью предложенного И. А. Молотковым обобщения принципа Ферма было исследовано искажение лучевых траекторий при повышении мощности сигнала и дана оценка условий формирования нелинейного волнового канала в окрестности максимума F-слоя (рис. 4).

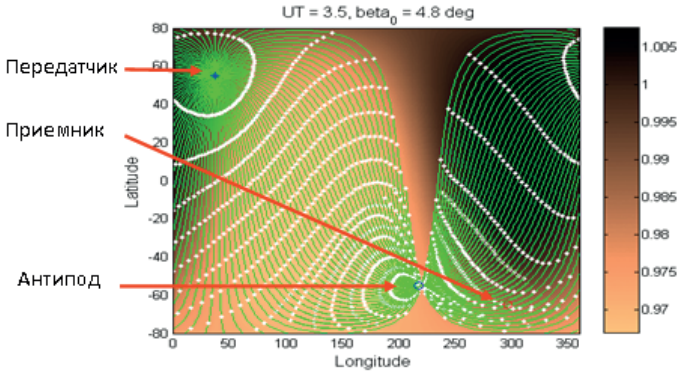


Рис. 3. Траектории распространения декаметровых радиоволн и точки отражения от земной поверхности на трассе Москва-УАС (украинская антарктическая станция) «Академик Вернадский», Антарктический полуостров [Зализовский и др., 2007]

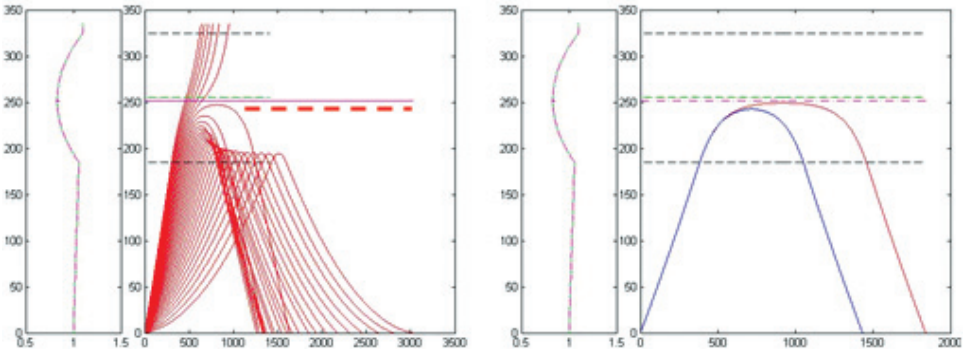


Рис. 4. Лучевые траектории в линейном приближении (*а*); искажение траекторий при повышении мощности передатчика и ось нелинейного волнового канала (*б*) [Molotkov et al., 2013]

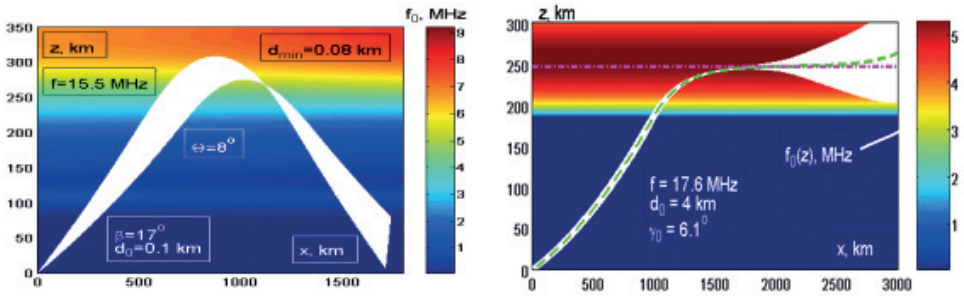


Рис. 5. Эволюция ширины гауссова пучка в зависимости от частоты и начального угла возвышения [Егоров и др., 2012]

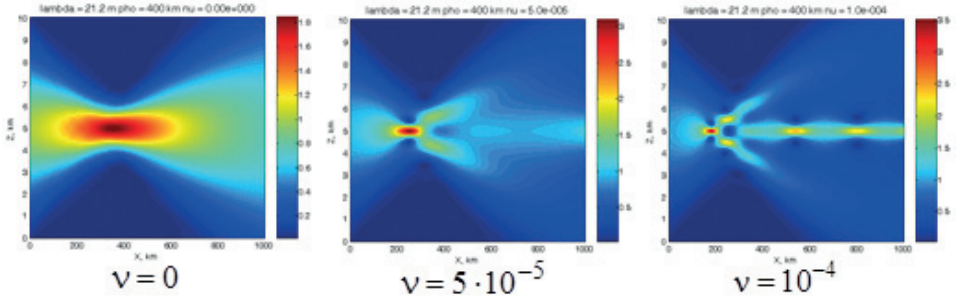


Рис. 6. Преобразование сходящегося гауссова пучка в нелинейную волноводную моду при увеличении параметра нелинейности

Для оценки возможности возбуждения нелинейного волновода с земной поверхности мощным радиоизлучением проводилось численное моделирование фокусировки гауссова пучка радиоволн в окрестности F-слоя (рис. 5) и решение нелинейного параболического уравнения

$$2ik\sqrt{\varepsilon}\frac{\partial W}{\partial x}+\frac{\partial^2 W}{\partial z^2}+k^2\nu\left|W\right|^2 W=0, \qquad (1)$$

описывающего его трансформацию в захваченную моду (рис. 6).

2. РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

Разработка численных методов решения параболического уравнения теории дифракции (уравнения Леонтовича-Фока), как продолжение пионерских работ Г.Д. Малюжинца [Малюжинец и др., 1964], ведётся в ИЗМИРАН с конца 1960-х гг. [Попов и др., 1989; Черкашин, 1985]. Работы лаборатории дифракции в 1990-х гг. были направлены на применение метода параболического уравнения к актуальным задачам распространения электромагнитных волн в природных средах и технических устройствах. Так, в лекции [Баранов и др., 1993] рассмотрено «гибридное» параболическое уравнение для расчёта распространения сверхдлинных волн в волноводе Земля-ионосфера, заменяющее традиционное импеданс-

ное приближение аккуратным учётом рефракции и поглощения радиоволн в D-области ионосферы. В работе [Baranov, Popov, 1993] методом двухмасштабных разложений получено обобщение параболического уравнения, позволяющее рассчитывать векторные электромагнитные волновые поля в неоднородных слоистых структурах, а в работе [Popov, Zhu, 2000], поддержанной грантом РФФИ-ННИО Германии, предложено трёхмерное векторное параболическое уравнение для расчёта электромагнитных полей в волноводах произвольного сечения (рис. 7).

Использование параболического уравнения

$$2ik\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}=0, \quad z>h(x) \tag{2}$$

с импедансным граничным условием

$$\frac{\partial u}{\partial z}+ik\left[\frac{\sqrt{\tilde{\varepsilon}-1}}{\tilde{\varepsilon}}-h'(x)\right]u=0, \quad \tilde{\varepsilon}=\varepsilon(x)+\frac{4\pi i\sigma(x)}{\omega} \tag{3}$$

радикально меняет качество прогнозов распространения радиоволн ультравысокочастотного (УВЧ) диапазона, позволяя закладывать в расчёт реальный профиль и электрические свойства земной поверхности: $h(x)$, $\varepsilon(x)$, $\sigma(x)$. Изменение пространственной структуры поля и амплитуды принимаемого сигнала за счёт неоднородного рельефа местности наглядно приведено на рис. 8.

Распространение нестационарных волновых пакетов

$$U(x,z,s)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{F}(k)u(x,z,k)\exp(-iks)\,\mathrm{d}k, \quad s=ct-x \tag{4}$$

вдоль земной поверхности исследовалось, в сотрудничестве с Штутгартским университетом, численным решением пространственно-временного аналога параболического уравнения (2):

$$2\frac{\partial^2 U}{\partial x\,\partial s}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}=0 \tag{5}$$

с нелокальным граничным условием, следующим из (3) и учитывающим дифракцию на неровностях рельефа и дисперсию импульса за счёт конечной проводимости почвы [Popov et al., 2002]. Для расчёта широкополосных УВЧ-радиосигналов было предложено «гибридное параболическое уравнение» [Попов, Копейкин, 2005]

$$2\left(ik_0-\frac{\partial}{\partial s}\right)\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}=0, \tag{6}$$

позволяющее моделировать расщепление радарного импульса при отражении от земной поверхности (рис. 9).

При численном расчёте волновых полей в открытом пространстве необходимо сформулировать краевое условие на границе вычислительной области, не приводящее к возникновению паразитных отражений от искусственной границы.

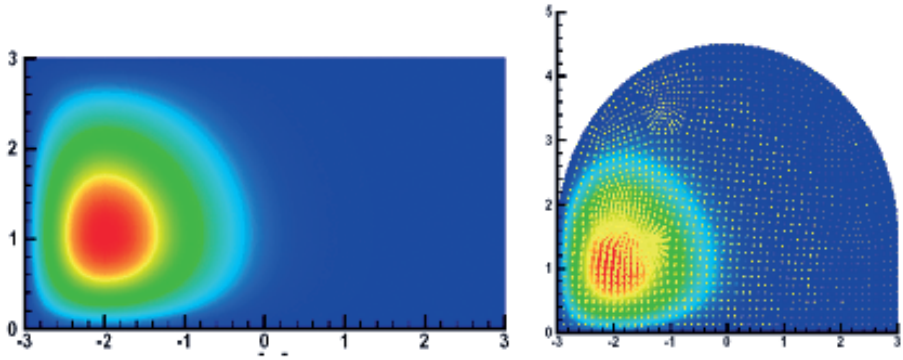
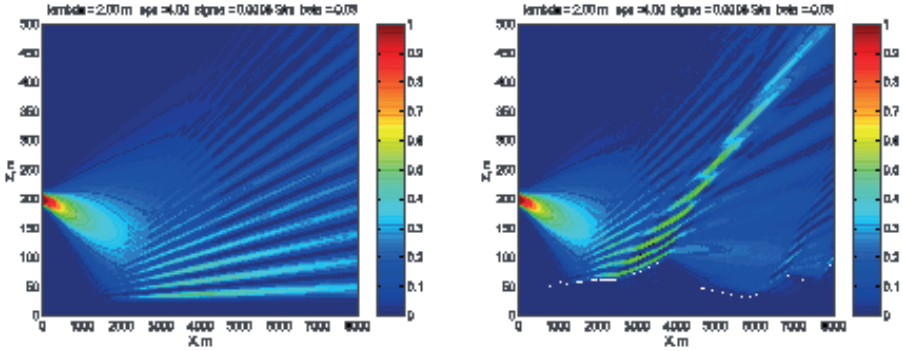
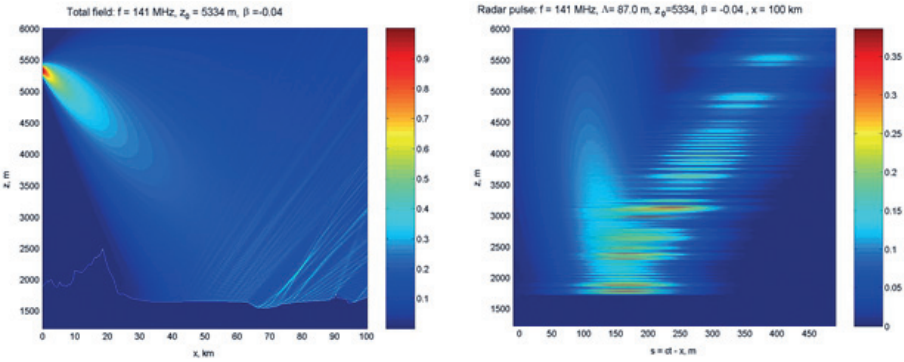


Рис. 7. Напряжённость и поляризация электрического поля при распространении ультракоротких волн (УКВ) на закруглении транспортных туннелей прямоугольного и сводчатого профиля



а *б*

Рис. 8. Влияние рельефа местности на распространение УКВ: *а* — поле приподнятого источника над идеализированной плоской границей; *б* — учёт реального профиля земной поверхности



а *б*

Рис. 9. Распространение УКВ над неоднородным рельефом: *а* — интерференция падающей и отражённой волны; *б* — расщепление широкополосного импульсного сигнала в зависимости от высоты точки наблюдения

Традиционный способ такого ограничения вычислительной области состоит в использовании искусственных поглощающих слоёв [Черкашин, 1985, Berenger, 1994]. Физически адекватное решение этой задачи — строгое условие прозрачности было предложено в работах [Baskakov, Popov, 1991, Popov, 1996]. В простейшем случае «одномерного» параболического уравнения (2), описывающего распространение параксиального волнового пакета $E(x, z) = u(x, z)\exp(ikx)$, абсолютная прозрачность искусственной горизонтальной границы $z = a$ (верхний край рис. 8, 9) обеспечивается нелокальным краевым условием

$$\frac{\partial u}{\partial z}(x,a) = -\sqrt{\frac{2k}{\pi i}}\frac{\partial}{\partial x}\int_0^x u(\xi,a)\frac{\mathrm{d}\xi}{\sqrt{x-\xi}} \equiv -\sqrt{\frac{2k}{i}\frac{\partial}{\partial x}}\,u(x,a), \tag{7}$$

коротко записывающимся через символ дробной производной. Идея «прозрачных» граничных условий, основанная на аналитическом представлении волнового поля в свободном пространстве, обладает большой общностью и позволяет строить эффективные вычислительные алгоритмы в различных областях электромагнитной теории [Попов, 2006].

В сотрудничестве с Физическим институтом им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) было развито приложение метода параболического уравнения к задачам рентгеновской оптики [Kopylov et al., 1995, 1996]. Специфика рентгеновского излучения (слабая рефракция и преобладающее поглощение) не позволяет использовать в качестве элементов изображающей оптики обычные линзы. Вместо них используются ажурные зонные пластинки (ЗП), расчёт которых представляет сложнейшую математическую задачу, требующую учёта эффектов дифракции, лучепреломления и поглощения в объёмной структуре кольцевых зон, интерференции сотен волновых пучков и их фокусировки в плоскости объекта. Адекватность параболического уравнения в задачах рентгеновской оптики как раз определяется слабостью рефракции рентгеновских лучей в материальных средах: $n = \sqrt{\varepsilon} = 1 - \delta + i\beta$, δ, $\beta \approx 10^{-3}...10^{-5}$, что позволяет использовать параксиальный анзац $E(x, y, z) = u(x, y, z)\exp(ikz)$ и перейти к параболическому уравнению

$$2ik\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k^2\left[\varepsilon(x,y,z) - 1\right]u = 0, \tag{8}$$

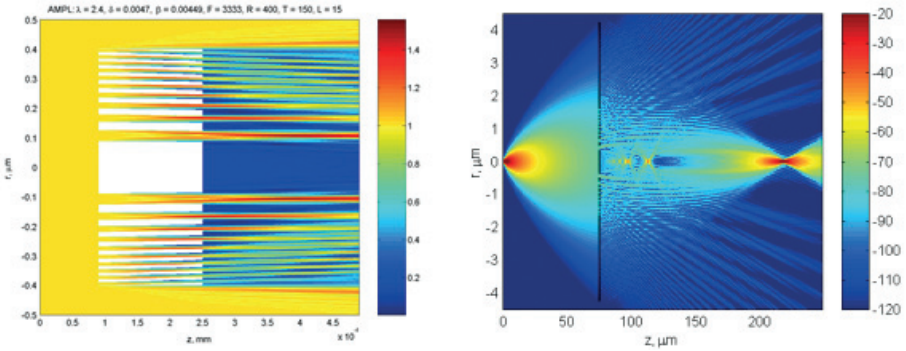
легко решающемуся численно в областях с характерными размерами в тысячи длин волн. Использование этого метода в практических задачах рентгеновской микроскопии [Attwood, 1999, Kurokhtin, Popov, 2002] позволило количественно исследовать структуру волнового поля как в теле оптического элемента, так и в свободном пространстве, включая область фокусировки (рис. 10), и указать пути повышения дифракционной эффективности ЗП.

Другим важным приложением метода параболического уравнения явились задачи волоконной оптики. В сотрудничестве с ФИАН и НЦВО РАН (Научный центр волоконной оптики Российской академии наук) были развиты эффективные методы расчёта и проектирования брэгговских волноводов инфракрасного диапазона [Likhachev et al., 2004; Popov et al., 2009;

Prokopovich et al., 2008]. С использованием трёхмерного параболического уравнения

$$2ik\overline{n}\frac{\partial u}{\partial z}+\Delta_{\perp}u+k^2\overline{n}^2\left[\alpha(r)+2\chi(z)r\cos\varphi\right]u=0 \qquad (9)$$

(здесь $\alpha(r)=\left(n^2(r)/\overline{n}^2\right)-1\approx 10^{-2}\ldots 10^{-3}$ — контраст показателя в квазипериодической оболочке световода; $n(r)$ — радиальная зависимость показателя преломления; $\overline{n}$ — его значение в сердечнике; $\chi(z)$ — кривизна его оси в плоскости $\varphi = 0$) рассчитывались условия возбуждения брэгговской волноводной моды, её затухание и изгибные потери (рис. 11, 12).



а *б*

Рис. 10. Амплитуда поля в теле модельной зонной пластинки (*а*); фокусировка точечного источника реальной ЗП (*б*)

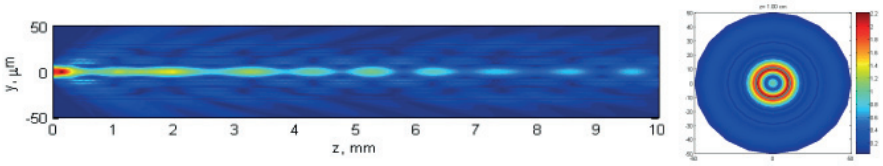
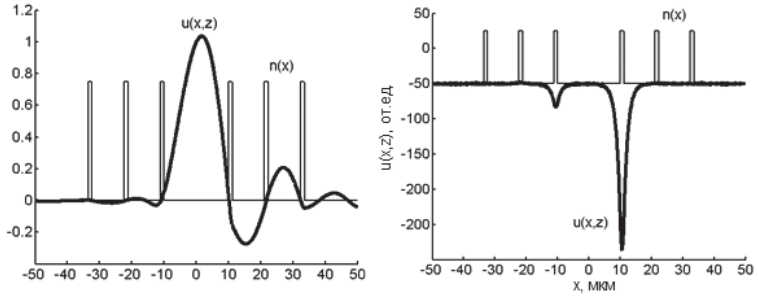


Рис 11. Установление моды брэгговского световода



а *б*

Рис 12. Искажение центральной моды при изгибе брэгговского волновода (*а*); локализованная в оболочке кольцевая мода (*б*)

Обращает на себя внимание центробежный сдвиг максимума брэгговской моды и выход её за пределы периодической оболочки (см. рис. 12), приводящий при уменьшении радиуса закругления к росту радиационных потерь, а затем к её вырождению в одну из захваченных кольцевых мод.

3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИФРАКЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН

Наряду с прикладными задачами электродинамики, в работах лаборатории рассматриваются общие вопросы теории дифракции и распространения волн. Одним из направлений является развитие метода поперечной диффузии, сформулированного в классической работе Г. Д. Малюжинца [Малюжинец, 1959]. Принцип поперечной диффузии играет в физической теории дифракции роль сопоставимую с приближением Френеля-Кирхгофа, принципом локальности Фока и концепцией дифракционных лучей Келлера. Эта концепция, трактующая явление дифракции как диффузию комплексной волновой амплитуды из освещённой области в зону тени вдоль фронтов обобщённой геометрической оптики, хорошо согласуется со строгим решением канонической задачи дифракции на клине (рис. 13) и существенно упрощает расчёт волнового поля $E(\rho, \varphi)$, сводя его к решению параболического уравнения в лучевых координатах [Малюжинец, 1959; Малюжинец и др., 1964]

$$2i\frac{\partial u}{\partial \rho}+i\frac{u}{\rho}+\frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2}=0, \quad \rho=kr \tag{10}$$

для медленной амплитуды $u(\rho, \varphi)$ дифрагированной волны $E_d = u\exp(i\rho)$.

Задача излучения волн источниками, распределёнными вдоль грани клина, требует некоторого обобщения метода Малюжинца. В работе [Запуниди, Попов, 2007] показано, что каждая плоская волна или неоднородная угловая гармоника в спектре излучаемой волны имеет свою границу тени, на которой в силу фазового синхронизма рождается цилиндрическая дифрагированная волна (рис. 14). Решение уравнения (11) с правой частью $A(\rho, \varphi)$, описывающей размазанную границу тени, является эффективным способом расчёта излучения в клиновидной области.

Другим примером успешного использования метода поперечной диффузии является задача излучения волн с криволинейной выпуклой поверхности. В этой задаче параболическое уравнения Малюжинца [Малюжинец, 1959] в лучевых координатах (ξ, s) имеет довольно сложный вид

$$ik\left(2\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{1}{\xi+\rho(s)}\frac{\partial h_s}{\partial \xi}u\right)+\frac{\rho(s)}{\xi+\rho(s)}\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{\rho(s)}{\xi+\rho(s)}\frac{\partial u}{\partial s}\right)=0, \tag{11}$$

где $\rho(s)$ — радиус кривизны начального фронта S; ξ — расстояние по нормали к S. Однако, как показано в работе [Popov, 2013], при любой зависимости $\rho(s)$ заменой переменных оно сводится к уравнению с постоянными коэффициентами в прямоугольной области $0 < t < \lambda/L$, $0 < \varphi < 2\pi$, где $\lambda = 2\pi/k$ — длина волны; L — периметр, и решается аналитически

в замкнутом виде. Численные примеры, приведённые на рис. 15 показывают хорошую точность приближения поперечной диффузии для значений $\lambda/L \leqslant 0{,}1$.

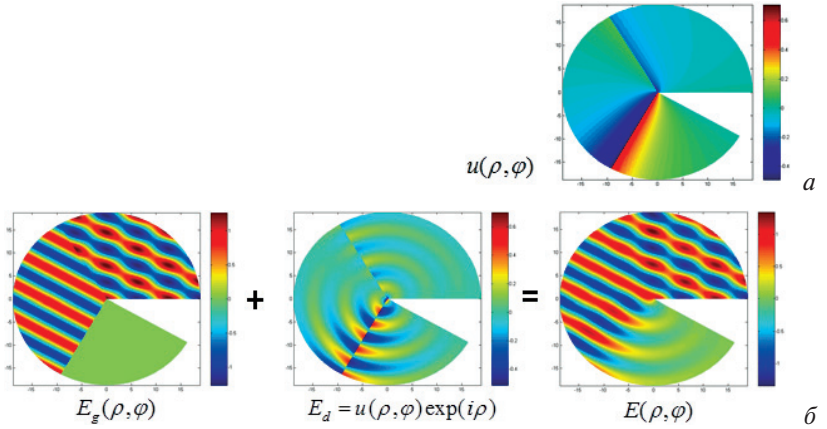


Рис. 13. Дифракция на клине: *а* — поперечная диффузия амплитуды на границах тени; *б* — сложение дифрагированной волны с геометрической оптикой $E_g(\rho, \varphi)$

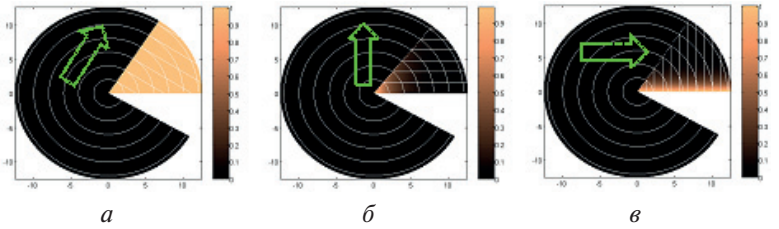


Рис. 14. Границы тени для различных типов излучения с грани клина: *а* — плоская волна; *б* — неоднородная волна; *в* — бегущая поверхностная волна

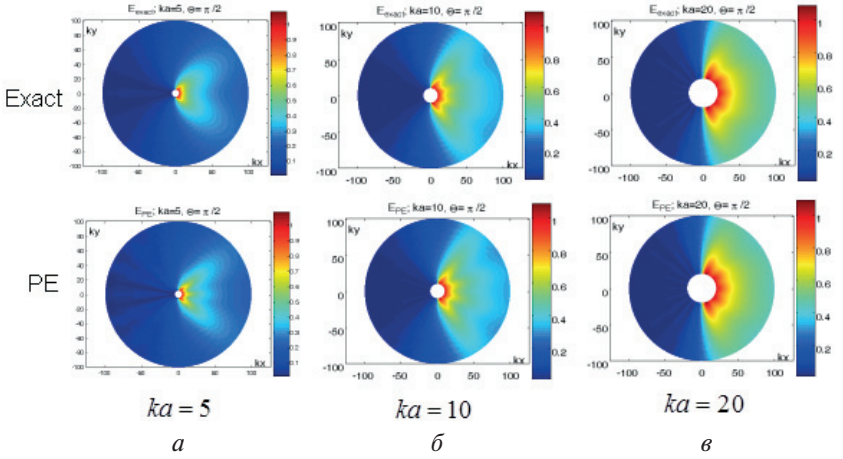


Рис. 15. Излучение с поверхности кругового цилиндра: *а* — точное решение; *б* — приближение поперечной диффузии

Эти примеры показывают перспективность использования метода поперечной диффузии в реальных задачах излучения и рассеяния электромагнитных волн.

Теория распространения волн в периодических средах тесно связана с явлением параметрического резонанса, возникающего при периодической модуляции собственной частоты линейного осциллятора

$$u'' + \omega^2(t)u = 0, \quad \omega(t+T) = \omega(t). \tag{12}$$

Несмотря на полуторавековую историю вопроса, начинающуюся с фундаментальных результатов Флоке и Хилла, физическая теория параметрического резонанса ограничивалась случаем малых возмущений и хорошо изученным уравнением Матье. В работах [Попов и др., 2009; Popov, 2008] предложен аналитический подход, позволяющий построить континуум точных решений уравнения колебаний и в замкнутом виде найти инкремент параметрического резонанса. Метод основан на переходе к новой независимой переменной, определённой как фаза ангармонических колебаний:

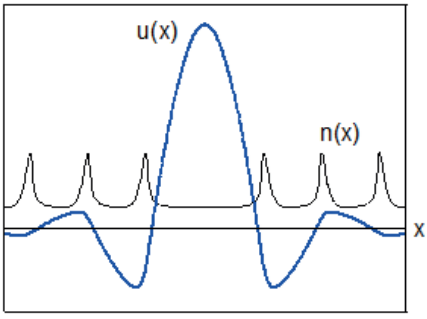
$$\psi(t) = \operatorname{arcctg}\frac{u'(t)}{\omega(t)u(t)}, \quad \omega(t) = \Omega(\psi). \tag{13}$$

Было показано, что при замене $u = U(\varphi)$, $t = T(\varphi)$ уравнение (12) преобразуется в систему нелинейных уравнений, интегрирующихся при любой зависимости $\Omega(\varphi)$, а резонанс определяется единственной гармоникой b_{2m} в ряде Фурье для функции $g(\varphi) = -\ln \Omega(\varphi)$

$$g(\psi) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty}\left(a_{2m}\cos 2m\psi + b_{2m}\sin 2m\psi\right). \tag{14}$$

Совершенно аналогично выводится явная формула для декремента затухания волн в периодической среде. Подобно тому, как ребёнок легко находит оптимальный способ раскачивания качелей, подстраиваясь к текущей фазе колебаний, метод фазового параметра позволяет найти оптимальный профиль показателя преломления в периодической оболочке брэгговского волновода (рис. 16).

а



б

Рис. 16. Раскачивание качелей (*а*); профиль показателя преломления, обеспечивающий быстрейшее затухание поля в оболочке брэгговского волновода (*б*)

Дальнейшее развитие метода фазового параметра связано с исследованием частотной зависимости блоховских волн в запрещённых зонах и областях прозрачности периодической среды [Popov, Kovalchuk, 2013].

4. ПРОБЛЕМЫ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ещё одно направление работ лаборатории, связанное с решаемыми в Отделе распространения радиоволн ИЗМИРАН задачами подповерхностного радиозондирования, включает проблемы излучения и распространения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в материальных средах, обратную задачу восстановления структуры подповерхностной среды и СВЧ-радиоголографию.

Излучение радиоволн антенной, расположенной вблизи земной поверхности, исследовалось в классических трудах А. Зоммерфельда, В. А. Фока, Л. М. Бреховских и др. Задача излучения гармонических волн в подповерхностную среду бесконечной линией тока, вытянутой вдоль границы раздела, рассматривалась в работе Н. Энгеты с соавторами [Engheta et al., 1981]. Обобщение этого результата на случай импульсного излучения георадара выполнено в работе [Едемский et al., 2011; Edemsky et al., 2011б] методом функционально-инвариантных решений Смирнова-Соболева [Соболев, 1937]. Функция Грина, соответствующая единичной ступеньке тока, имеет вид: $G(r, \theta, t) = (1/r)V(\tau, \theta)$, $\tau = ct/r$ и выражается в элементарных функциях.

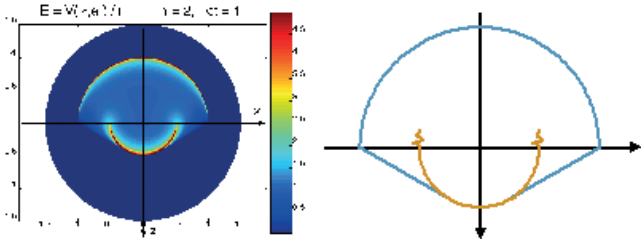
Это решение количественно описывает особенности импульсного волнового поля, предсказываемые геометрической теорией дифракции (рис. 17) и позволяет легко рассчитывать волновое возмущение, вызываемое заданным током $I(t)$ в линейно-протяженной антенне, с помощью интеграла Дюамеля (рис. 18*а*)

$$E(r,\theta,t) = -\frac{2}{cr}\int_{r}^{ct}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}(t-t')\overset{\pm}{V}\left(\frac{ct'}{r},\theta\right)\mathrm{d}t'. \qquad (15)$$

Несмотря на принятые в этой модели упрощения, рассчитанная пространственно-временная диаграмма излучения неплохо согласуется с экспериментальными данными (рис. 18*б*).

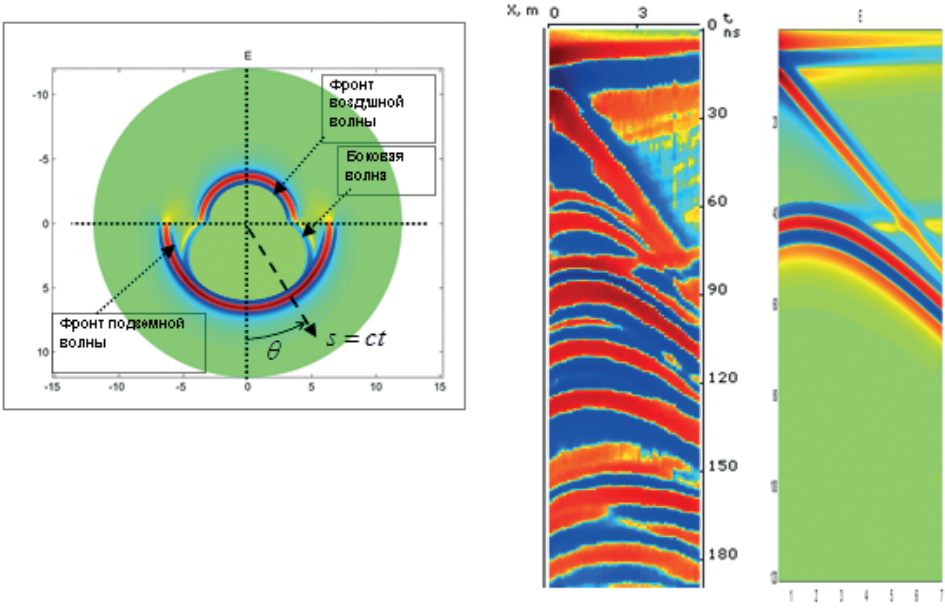
Дальнейшее развитие этой модели связано с учётом реальных параметров антенны георадара (конечная длина, распределённая резистивная нагрузка) и способа возбуждения (разряд конденсатора в разрыве диполя) [Прокопович, Попов, 2013].

При распространении электромагнитных импульсов в неоднородной подповерхностной среде наряду с рефракцией возникает дисперсионное искажение за счёт конечной проводимости среды. Эти эффекты исследованы в работе [Vinogradov et al., 1997] методом двухмасштабных разложений, а в работе [Vinogradov et al., 2004] уравнения связанных волн Бреммера-Бреховских были использованы для расчёта частичных отражений георадарного импульса на градиентах подповерхностной среды и решения одномерной обратной задачи восстановления вертикального профиля диэлектрической проницаемости (рис. 19).



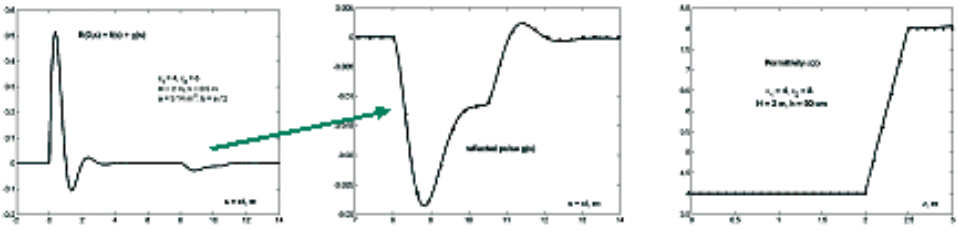
а *б*

Рис. 17. «Мгновенный снимок» импульсной функции Грина линейного тока на границе однородного полупространства с показателем преломления $n = \sqrt{\varepsilon} = 2$ (*а*); волновые фронты цилиндрических волн и боковой волны (*б*)



а *б*

Рис. 18. Пространственно-временная диаграмма излучения $E(r, \theta, t) = \text{const}$ (*а*); сравнение георадарного годографа с модельным расчётом [Едемский, 2010] (*б*)



а *б* *в*

Рис. 19. Отражение модельного импульса на градиенте диэлектрической проницаемости (*а*); волновая форма отражённого импульса (*б*); восстановленный профиль диэлектрической проницаемости (*в*)

В работе [Edemskii et al., 2011a] был развит метод восстановления локализованных подповерхностных объектов по данным георадиолокации, основанный на приближении «взрывающихся источников» (по аналогии с методом «взрывающегося рефлектора», широко применяемым в сейсморазведке). Была рассмотрена модельная задача о синхронном возбуждении подповерхностных источников: $J(x, z, t) = f(t)w(x, z)$ с неизвестным пространственным распределением $w(x, z)$. Показано, что при заданной форме импульса тока $f(t)$ и измеренном пространственно-временном распределении возникающего волнового возмущения на поверхности $z = 0$

интегральное уравнение для плотности токов $w(x, z)$:

$$g(x,t) \equiv -\frac{\varepsilon c}{2} E(x,0,t) = \int_0^\infty \dot{f}(t-\tau)d\tau \iint\limits_{l^2+z^2<c^2\tau^2/\varepsilon} w(x+l,z)\frac{\mathrm{d}l\,\mathrm{d}z}{\sqrt{c^2\tau^2-\varepsilon(l^2+z^2)}} \quad (16)$$

преобразуется в задачу томографии

$$m(x,r) = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} w(x+r\sin\theta, r\cos\theta)\,\mathrm{d}\theta, \quad (17)$$

имеющую однозначное аналитическое решение. Схему круговой томографии и численный пример восстановления подповерхностных импульсных источников иллюстрирует рис. 20.

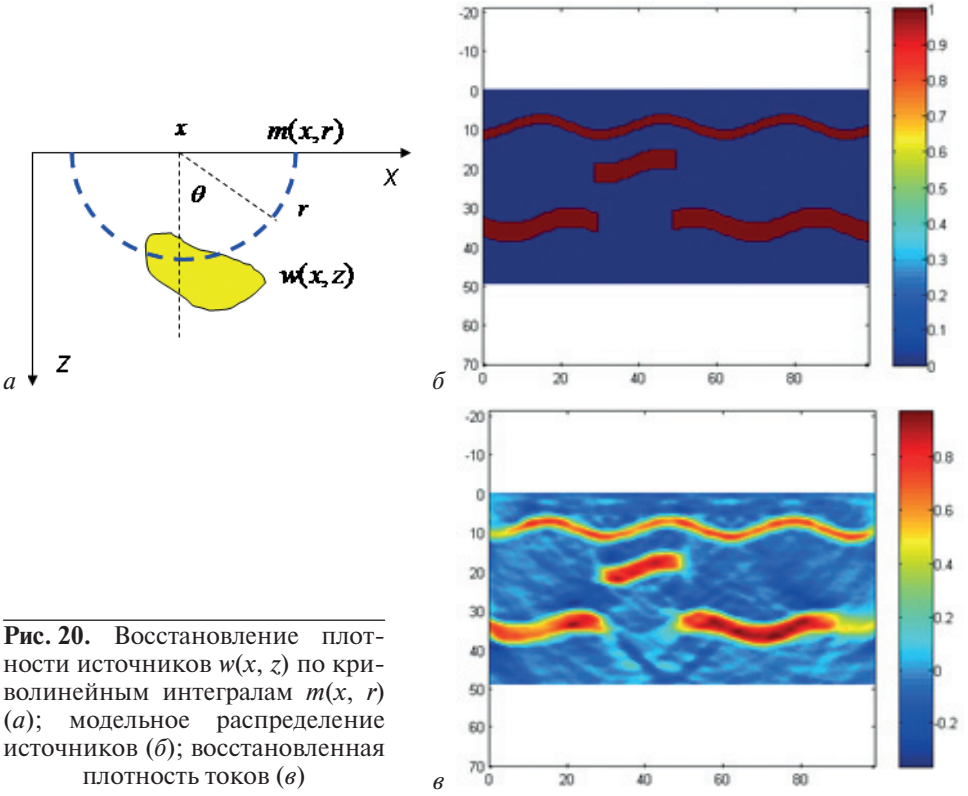


Рис. 20. Восстановление плотности источников $w(x, z)$ по криволинейным интегралам $m(x, r)$ (*а*); модельное распределение источников (*б*); восстановленная плотность токов (*в*)

В сотрудничестве с Институтом физической диагностики и моделирования (ИФДМ) исследовались приложения этих результатов к задачам нефтегазовой отрасли [Попов и др., 2011].

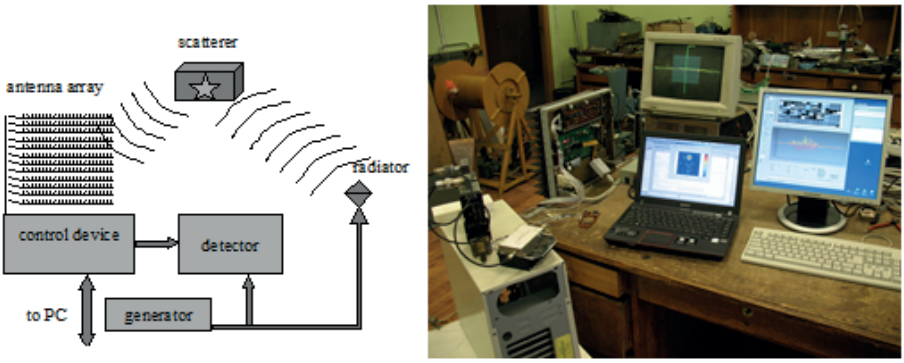
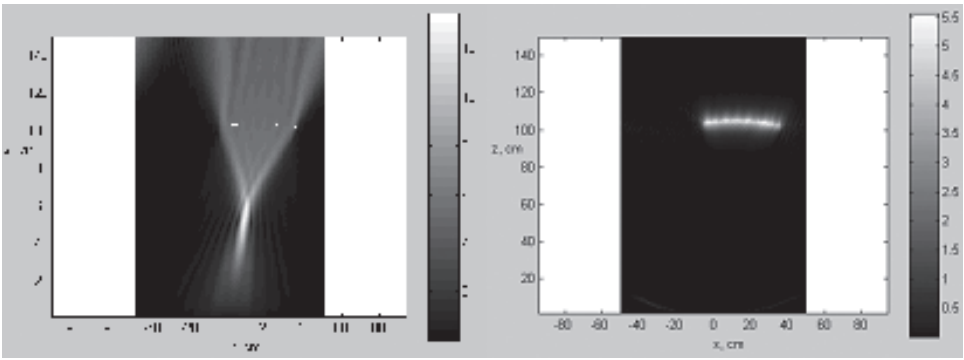
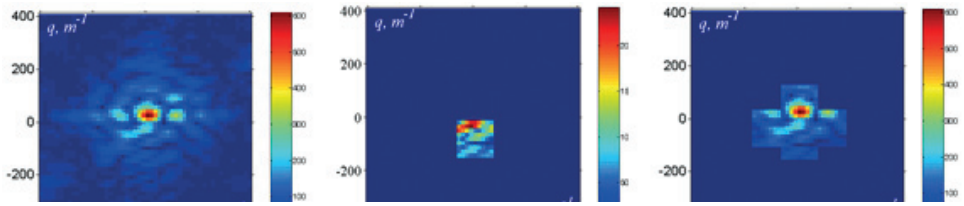


Рис. 21. Принципиальная схема (слева) и первая реализация (справа) голографического СВЧ-радара [Копейкин и др., 2003]



а *б*

Рис. 22. Радиоизображение вогнутого рассеивателя, восстановленное методом «анти-Кирхгофа» (численное моделирование) (*а*); использование двухчастотной фазовой коррекции (*б*)



а *б* *в*

Рис. 23. Тест-объект и его пространственный спектр (верхний рисунок) (*а*); часть спектра, регистрируемая голографической антенной решёткой, и дифракционно-лимитированное изображение при фиксированном положении облучателя (показано звёздочкой) (*б*); синтезированный спектр, полученный при многоракурсном облучении, и улучшенное радиоизображение (*в*)

Исследование задач радиоголографии ведётся в лаборатории дифракции с начала 2000-х гг. [Виноградов, Попов, 2001; Копейкин, Попов, 2000] параллельно с разработкой прототипа подповерхностного сверхвысокочастотного (СВЧ) радара (рис. 21).

Из теоретических результатов можно отметить формулу «анти-Грина» для оценки разрешающей способности радара, метод фокусированных гауссовых пучков и использование двухчастотных фазовых измерений для локализации рассеивающего объекта (рис. 22) [Popov, Vinogradov, 2002; Popov et al., 2003].

В недавних работах [Едемский и др., 2014; Popov et al., 2014] развита спектральная теория формирования голографического радиоизображения и предложен метод многоракурсного когерентного зондирования, позволяющего ослабить дифракционные ограничения разрешающей способности прибора и радикально повысить возможность распознавания лоцируемого объекта (рис. 23).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Этот краткий обзор даёт представление о круге задач прикладной электромагнитной теории, решавшихся в лаборатории дифракции ИЗМИРАН за прошедшую четверть века в тесном контакте с другими подразделениями отдела распространения радиоволн в ионосфере. Расширению тематики и развитию новых подходов способствовало творческое сотрудничество с другими российскими институтами (ФИАН, НЦВО РАН, ОАО ВНИИСМИ (Открытое акционерное общество «Институт механизированного инструмента»), ИФДМ и зарубежными коллегами из РИ НАНУ, Центра космических исследований Польской Академии наук, Штутгартского университета (ФРГ, Universität Stuttgart), Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США, Berkeley Lab, LBNL). Особо следует отметить роль аспирантов и молодых сотрудников лаборатории: Ю. В. Копылова, В. А. Баскакова, В. А. Виноградова, А. Н. Курохтина, С. А. Запуниди, Д. В. Прокоповича, Ф. Д. Едемского, решавших в ходе подготовки своих диссертаций серьёзные научные задачи. К сожалению, часть из них, уйдя из академической науки, не довела практически готовые работы до защиты. Но, как говорится, это уже другая история...

ЛИТЕРАТУРА

[Баранов и др., 1993] *Баранов В. А.*, *Новикова И. О.*, *Попов А. В.* Некоторые модификации волнового параболического уравнения // Тр. 10-й Шк.-семинара по дифракции и распространению волн. М., 1993. С. 39–65.

[Виноградов, Попов, 2001] *Виноградов В. А.*, *Попов А. В.* Моделирование голографического подповерхностного радара // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41. № 2. С. 253–262.

[Гуревич, Цедилина, 1979] *Гуревич А. В.*, *Цедилина Е. Е.* Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979.

[Егоров и др., 1999] *Егоров И. Б.*, *Коломийцев О. П.*, *Ружин Ю. Я.*, *Черкашин Ю. Н.* Модельное исследование влияния ионосферных дыр на условия распространения декаметровых радиоволн // ДАН. 1999. Т. 369. № 4. С. 529–532.

[Егоров и др., 2012] *Егоров И. Б.*, *Еременко В. А.*, *Молотков И. А.*, *Попов А. В.*, *Черкашин Ю. Н.* Особенности распространения узкого мощного волнового пучка в ионосферной плазме // 1-я Украинская конф. «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства»: сб. тез. докл. Харьков. 2012. С. 58–61.

[Едемский, 2010] *Едемский Ф. Д.* Модельные задачи и практические методики импульсного подповерхностного зондирования: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. ИЗМИРАН, 2010.

[Едемский и др., 2011] *Едемский Ф. Д.*, *Запуниди С. А.*, *Попов А. В.* Импульсное излучение линейно-протяжённой антенны на границе земля-воздух // 23-я Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн»: сб. докл. 2011. Т. 3. С. 316–320.

[Едемский и др., 2014] *Едемский Д. Е.*, *Копейкин В. В.*, *Попов А. В.*, *Прокопович И. В.* Спектральная теория формирования изображения в радиоголографии // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 2. С. 41–50.

[Зализовский и др., 2007] *Зализовский А. В.*, *Галушко В. Г.*, *Кащеев А. С.*, *Колосков А. В.*, *Ямпольский Ю. М.*, *Егоров И. Б.*, *Попов А. В.* Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47. № 5. С. 674–684.

[Запуниди, Попов, 2007] *Запуниди С. А.*, *Попов А. В.* Физическая картина излучения волн в клиновидной области: обобщение метода поперечной диффузии // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2007. Т. 47. № 9. С. 1609–1623.

[Коломийцев и др., 2003] *Коломийцев О. П.*, *Егоров И. Б.*, *Попов А. В.*, *Суроткин В. А.*, *Черкашин Ю. Н.* Моделирование особенностей распространения декаметровых радиоволн в экваториальной ионосфере в часы восхода Солнца// Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 6. С. 1–7.

[Копейкин, Попов, 2000] *Копейкин В. В.*, *Попов А. В.* Принципы построения голографического подповерхностного радара // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 3. С. 224–233.

[Копейкин и др., 2003] *Копейкин В. В.*, *Попов А. В.*, *Резников А. Е.*, *Ринкус В. В.*, *Якубень Л. М.*, *Аннакулиев С. К.*, *Виноградов В. А.*, *Запуниди С. А.* Макет голографического подповерхностного радара: аппаратурная часть // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8. № 10. С. 66–70.

[Малюжинец, 1959] *Малюжинец Г. Д.* Развитие представлений о явлениях дифракции // УФН. 1959. Т. 69. № 2. С. 321–334.

[Малюжинец и др., 1964] *Малюжинец Г. Д.*, *Попов А. В.*, *Черкашин Ю. Н.* К развитию одного вычислительного метода в теории дифракции // 3-й Всесоюз. симп. по дифракции волн: реф. докл. М.: Наука, 1964. С. 176–178.

[Попов, 1986] *Попов А. В.* Метод плавных возмущений в теории широких нерегулярных волноводов: автореф. дис. ... д-ра физ.- мат. наук. М.: ИЗМИРАН, 1986. 28 с.

[Попов, 2006] *Попов А. В.* К расчёту параксиальных волновых полей с использованием граничных условий прозрачности // Журн. вычислит. матем. и матем. физики. 2006. Т. 46. № 9. С. 1675–1681.

[Попов, Копейкин, 2005] *Попов А. В.*, *Копейкин В. В.* К расчёту распространения электромагнитных импульсов вдоль земной поверхности // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 1. С. 20–35.

[Попов и др., 1989] *Попов А. В.*, *Цедилина Е. Е.*, *Черкашин Ю. Н.* Новые методы расчёта коротковолновых радиотрасс // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли. М.: Наука, 1989. С. 146–162.

[Попов и др., 2009] *Попов А. В.*, *Виноградов А. В.*, *Прокопович Д. В.* О явном параметрическом описании волн в периодических средах // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 2009. Т. 49. № 6. С. 1119–1130.

[Попов и др., 2011] *Попов А.*, *Запуниди С.*, *Едемский Ф.* Совместные работы ИФДМ и ИЗМИРАН // Институт физической диагностики и моделирования. М.: Кодекс, 2011. С. 232–240.

[Прокопович, Попов, 2013] *Прокопович И. В.*, *Попов А. В.* Импульсное возбуждение резистивно-нагруженной дипольной антенны // Изв. ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 111–113.

[Соболев, 1937] *Соболев С.* Некоторые вопросы теории распространения колебаний // *Франк Ф.*, *Мизес Р.* Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики: пер. с нем. 1937. Ч. 2. Гл. 12. С. 468–616.

[Черкашин, 1985] *Черкашин Ю. Н.* Моделирование коротковолновых полей в ионосфере: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИЗМИРАН, 1985.

[Attwood, 1999] *Attwood D.* Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation. Principles and Applications. Cambridge University Press, 1999. 25 p.

[Baranov, Popov, 1993] *Baranov V. A.*, *Popov A. V.* Generalization of the Wave Parabolic Equation for EM Waves in a Dielectric Layer of Nonuniform Thickness // Wave Motion. 1993. V. 17. P. 337–347.

[Baranov et al., 1992] *Baranov V. A.*, *Karpenko A. L.*, *Popov A. V.* Evolution of Gaussian Beams in the Nonuniform Earth-Ionosphere Waveguide // Radio Science. 1992. V. 27. P. 307–314.

[Baskakov, Popov, 1991] *Baskakov V. A.*, *Popov A. V.* Implementation of transparent boundaries for numerical solution of the Schroedinger equation // Wave Motion. 1991. V. 14. P. 123–128.

[Berenger, 1994] *Berenger J.-P.* A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Comp. Phys. 1994. V. 114. P. 185–200.

[Edemskii et al., 2011a] *Edemskii F. D.*, *Popov A. V.*, *Zapunidi S. A.*, *Pavlovskii B. R.* Exact solution of a model problem of subsurface sensing // J. Mathematical Sciences. 2011. V. 175. No. 6. P. 637–645.

[Edemsky et al., 2011b] *Edemsky F.*, *Popov A.*, *Zapunidi S.* A time domain model of GPR antenna radiation pattern. International // J. Electronics and Telecommunications. 2011 V. 57. No. 3. P. 407–411.

[Engheta et al., 1981b] *Engheta N.*, *Papas C. H.*, *Elachi C.* Interface extinction and subsurface peaking of the radiation pattern of a line source // Applied Physics. 1981. V. B26. P. 231–238.

[Kopylov et al., 1995] *Kopylov Yu. V.*, *Popov A. V.*, *Vinogradov A. V.* Application of the parabolic wave equation to X-ray diffraction optics // Optics Communications. 1995. V. 118. P. 619–636.

[Kopylov et al., 1996] *Kopylov Yu. V.*, *Popov A. V.*, *Vinogradov A. V.* Diffraction phenomena inside thick Fresnel zone plates // Radio Science. 1996. V. 31. No. 6. P. 1815–1822.

[Kurokhtin, Popov, 2002] *Kurokhtin A. N.*, *Popov A. V.* Simulation of high resolution X-ray zone plates // J. Optical Soc. Amer. A. 2002. V. 19. No. 2. P. 315.

[Likhachev et al., 2004] *Likhachev M.*, *Semjonov S.*, *Popov A.*, *Vinogradov A.*, *Dianov E. M.* Depressed core Bragg waveguides: experiment and simulation. ICTON 2004 // Proc. 6th Intern. Conf. Transparent Optical Networks. Wroclaw, Poland. 2004. V. 2. P. 117–120.

[Molotkov et al., 2013] *Molotkov I. A.*, *Atamaniuk B.*, *Popov A. V.* Interaction of oblique wave beam with ionospheric layer F2 // Advances in Space Research. 2013. V. 51. No. 12. P. 2333–2341.

[Popov, 1996] *Popov A. V.* Accurate modeling of transparent boundaries in quasioptics // Radio Science. 1996. V. 31. No. 6. P. 1781–1790.

[Popov, 2008] *Popov A.* Parametric theory of parametric resonance // 5th Intern. Workshop Electromagnetic Wave Scattering. Antalya, Turkey. 2008. P. 2-9–2-13.

[Popov, 2013] *Popov A.* Radiation from a convex equi-phase surface: Malyuzhinets' parabolic equation. Days on Diffraction // Proc. Intern. Conf. St. Petersburg. 2013. P. 116–120.

[Popov, Ciarkowski, 2009] *Popov A.*, *Ciarkowski A.* A model problem for ultra-wide band ionospheric sounding // Wave Motion. 2009. V. 46. P. 480–487.

[Popov, Kovalchuk, 2013] *Popov A.*, *Kovalchuk V.* Parametric representation of wave propagation in non-uniform media (both in transmission and stop bands) // Mathematical Methods in the Applied Sciences. 2013. V. 36. Iss. 11. P. 1350–1362.

[Popov, Vinogradov, 2002] *Popov A. V.*, *Vinogradov V. A.* Focused Gaussian beams in the problem of holographic imaging // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2002. V. 50. No. 9. P. 1236–1244.

[Popov, Zhu, 2000] *Popov A. V.*, *Zhu N. Y.* Modeling radio wave propagation in tunnels with a vectorial parabolic equation // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2000. V. 48. No. 9. P. 1403–1412.

[Popov et al., 2002] *Popov A. V.*, *Kopeikin V. V.*, *Zhu N. Y.*, *Landstorfer F. M.* Modelling EM transient propagation over irregular dispersive boundary // Electronics Letters. 2002. V. 38. No. 14. P. 691–692.

[Popov et al., 2003] *Popov A. V.*, *Kopeikin V. V.*, *Vinogradov A. V.*, *Zapunidi S. A.* Reconstruction Algorithms and Experiments with a Prototype of Holographic Subsurface Radar // Proc. 4th Intern. Conf. Antenna Theory and Techniques. IEEE, Sevastopol, Ukraine. 2003. V. 2. P. 561–563.

[Popov et al., 2009] *Popov A.*, *Prokopovich D.*, *Vinogradov A.* Beam propagation through straight and bent Bragg waveguides // ICTON 2009: Proc. 11th Intern. Conf. Transparent Optical Networks, We.C2.3. Ponta Delgada, Portugal. 2009. P. 1–4.

[Popov et al., 2014] *Popov A.*, *Prokopovich I.*, *Kopeikin V.*, *Edemskii D.* Synthetic aperture approach to microwave holographic image improvement // Days on Diffraction 2013: Proc. Intern. Conf. IEEE. St. Petersburg. 2014.

[Prokopovich et al., 2008] *Prokopovich D. V.*, *Popov A. V.*, *Vinogradov A. V.* Analytical and numerical aspects of Bragg fiber design. Progress // Electromagnetics Research B. 2008. V. 6. P. 361–379.

[Vinogradov et al., 1997] *Vinogradov V. A.*, *Baranov V. A.*, *Popov A. V.* Two-scale asymptotic description of radar pulse propagation in lossy subsurface medium // 13th Annu. Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics. Monterey, CA. 1997. P. 1049–1056.

[Vinogradov et al., 2004] *Vinogradov V. A.*, *Kopeikin V. V.*, *Popov A. V.* An approximate solution of 1D inverse problem // 10th Intern. Conf. Ground Penetrating Radar. Delft, Netherlands. 2004. P. 95–98.

RESEARCH WORKS OF IZMIRAN DIFFRACTION LABORATORY

A. V. Popov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

A review of research works done at the Diffraction Laboratory of IZMIRAN since the previous 50th anniversary collection was published in 1989. Along with the issues of ionospheric radio wave propagation, basic problems of diffraction theory, development of the parabolic equation method and topics of subsurface radio probing are considered.

Keywords: diffraction, radio wave propagation, physical optics, subsurface sensing.

Popov Alexei Vladimirovich — head of department, doctor of physical and mathematical sciences, popov@izmiran.ru