

УДК 538.56

В.П. ЯКУБОВ*, М. САТО**, А.В. КЛОКОВ*

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПОЛНЫХ И НЕЭКВИДИСТАНТНЫХ ДАННЫХ
ДЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ**

Рассматривается возможность использования данных дистанционного подповерхностного СШП-радиозондирования для 3D-локационной томографии при произвольной схеме сканирования. Работоспособность метода подтверждается результатами численных и натуральных экспериментов

Ключевые слова: локационная томография, интерполяция, фильтрация, полное внутреннее отражение.

В последнее время усилился интерес использованию сверхширокополосных (СШП) систем зондирования для различных задач дистанционного зондирования скрытых предметов. Такие задачи возникают при подповерхностной локации (GPR), локации инженерных сооружений, при поиске опасных предметов в багаже и под одеждой на теле человека. Как и все томографические системы, СШП-системы требуют многоракурсности съема информации. К сожалению, последовательный поэлементный обзор исследуемых сцен не всегда возможен. Так, возникает необходимость разработки методов восстановления томограмм по не полным данным. Существующие методы пока оставляют желать лучшего как по точности восстановления изображений, так и по быстройдействию [1]. Настоящая работа направлена на преодоление существующего пробела на основе развития метода фокусировки с использованием процедуры многомерной согласованной фильтрации. При этом ключевым элементом является восстановление аппаратной функции системы с учетом эффекта полного внутреннего отражения.

Суть предлагаемого метода обработки данных состоит в том, что матрица неполных и неэквидистантно измеренных данных дополняется нулями в недостающих точках. Далее производится согласованная фильтрация с предварительно рассчитанной аппаратной функцией системы (АФС) [2]. Под АФС понимается отклик системы на точечную неоднородность, располагающуюся в центре выбранной плоскости фокусировки на глубине h от плоскости регистрации. При расчете АФС необходимо иметь в виду то обстоятельство, что коэффициент преломления нижней (фоновой) среды n практически всегда имеет значительный контраст по сравнению с коэффициентом преломления воздуха равного 1. Поскольку зондирующая антенна находится в воздухе, а неоднородность – в нижней среде, возникает явление сильного преломления волны при переходе волны из одного полупространства в другое (рис. 1, а). Это явление подчиняется закону Снелля. Временное запаздывание волны τ определяется соотношением

$$Z = n\sqrt{x_1^2 + h^2} + \sqrt{(x - x_1)^2 + H^2} = \tau c/2 .$$

Вид соответствующей зависимости (дифракционной гиперболы) от координаты x показан кривой 1 на рис. 1, б. Расчет проведен при $H = 0,1$ см, $h = 20$ см и $n = 2$.

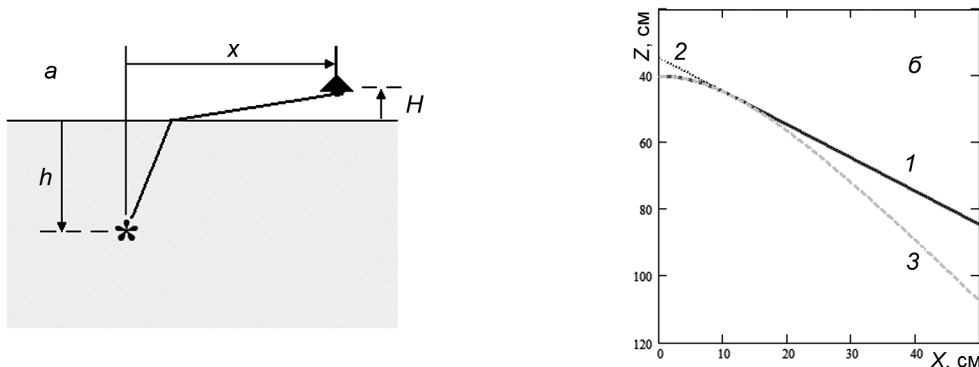


Рис. 1. К определению формы дифракционных гипербол

Путем простых вычислений можно показать, что при $x \rightarrow \infty$ кривая 1 асимптотически переходит в прямую 2, определяемую уравнением

$$Z = h\sqrt{n^2 - 1} + x .$$

Важно подчеркнуть, что наклон этой асимптотической прямой никак не зависит от коэффициента преломления нижней среды. Это является прямым следствием проявления эффекта полного внутреннего отражения. Заметим, что если бы антенна располагалась в нижнем полупространстве, то эффект полного внутреннего отражения не наблюдался бы и дифракционная гипербола определялась бы кривой 3, описываемой уравнением

$$Z = n\sqrt{x^2 + h^2}.$$

Этому соответствует асимптотика $Z = nx$ с наклоном, в n раз отличающимся от упомянутого выше.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что неучет влияния эффекта полного внутреннего отражения будет приводить к систематической ошибке в GPR-томографии подповерхностных неоднородностей, правда, до тех пор, пока поглощение в фоновой среде относительно не велико. В случае большого поглощения асимптотические участки дифракционных гипербол быстро обрываются, и при этом эффективно работают лишь малые окрестности вблизи вершин гипербол, т.е. там, где кривые 1 и 3 практически совпадают.

Разработанная методика была применена к экспериментальным данным с металлическим шаром диаметром 15 см [3]. Использование предложенной выше методики с анализом дифракционных гипербол позволило по измеренному фрагменту АФС определить средний коэффициент преломления фоновой среды – песка $n \approx 2,0$ и рассчитать полный вид АФС. После этого осталось выполнить фурье-интерполяцию неполных данных и осуществить согласованную фильтрацию. Результат (вертикальное и горизонтальное сечения восстановленной 3D томограммы) представлен на рис. 2. Полученные данные хорошо согласуются с результатами прямых измерений с помощью щупа.

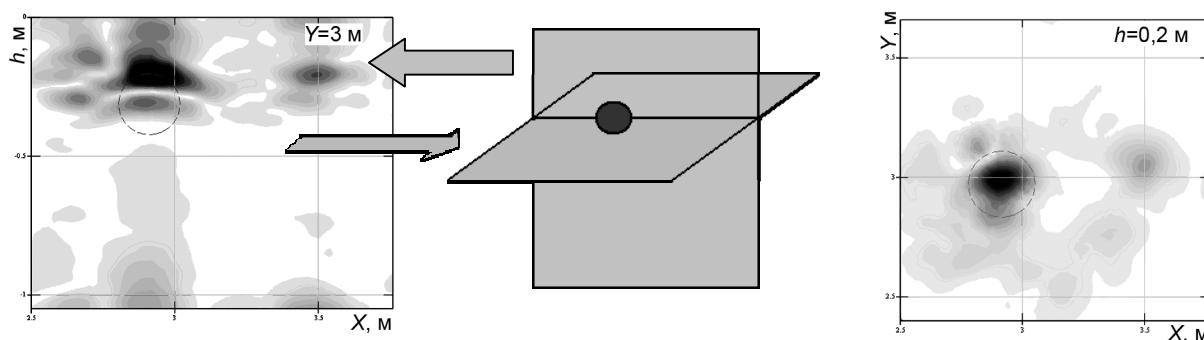


Рис. 2. Ортогональные сечения 3D томограммы

Проведенные исследования подтверждают работоспособность разработанного метода восстановления 3D томограммы по неполным экспериментальным данным с использованием фурье-интерполяции и многомерной согласованной фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gurbuz A., McClellan J., and Scott W. // IEEE Trans. on Signal Processing. – 2009. – V. 57. – No. 7. – P. 2640–2650.
2. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 10. – С. 53–60.
3. Клоков А.В., Якубов В.П., Сато М. // Материалы II науч.-практич. конф. «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 5–7 мая 2011. – С. 92–93.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.07.12.

**Центр Северо-азиатских исследований Университета Тохоку, Сендай, Япония
E-mail: yvlp@mail.tsu.ru

Якубов Владимир Петрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;

Сато Матююки, доктор, профессор, директор;

Клоков Андрей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент.