

УДК 621.396.96

В.В. Павликов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

ВЕСОВЫЕ ОКНА НА ОСНОВЕ АТОМАРНЫХ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗОНДИРУЕМЫХ СРЕД

Рассмотрено влияние модуляции зондирующего сигнала на результаты картографирования поверхностного и подповерхностного слоев зондируемых сред. В качестве модулирующих функций использованы весовые окна на основе атомарных функций.

атомарные функции, функция неопределенности, весовые окна

Введение

Задача картографирования слоев зондируемых сред занимает важное место в различных отраслях науки и народного хозяйства. Часто требуется помимо исследования поверхностных покровов исследовать слои, залегающие на некоторой глубине. Решение задачи подповерхностного картографирования в военном деле может позволить выявлять скрытую технику противника, тщательно замаскированную растительностью, обнаруживать пусковые шахты ракет, вести ледовую разведку материковых льдов и т.п.

В работе [1] показано, что применение антенной решетки и оптимальной пространственно-временной обработки сигналов позволяет фокусироваться на заданный приповерхностный слой.

Целью работы является применение модуляции зондирующего сигнала и функции затенения новыми весовыми окнами на основании атомарных функций (АФ) и исследование их влияния на качество формируемых радиолокационных изображений (РЛИ).

Постановка задачи. На рис. 1, 2 представлены идеальные (без шума) верхний и нижний слои зондируемой среды. Эффект просачивания между слоями при формировании РЛИ представлен на рис. 3 (слабое затухание в породе – эффект наложения изображения из нижнего слоя проявляется сильнее) и рис. 4 (сильное затухание в породе – эффект просачивания меньше).

На рис. 3 и 4 не учтено влияние спекл-шума, помехой является только соседний слой (далее называемый помеховым). Просачивание приводит к появлению на изображении исследуемого слоя объектов (точечных, протяженных и текстуры), ему не присущих.

Рассматривать далее целесообразно случай слабого затухания, так как при этом эффект просачивания проявляется больше.

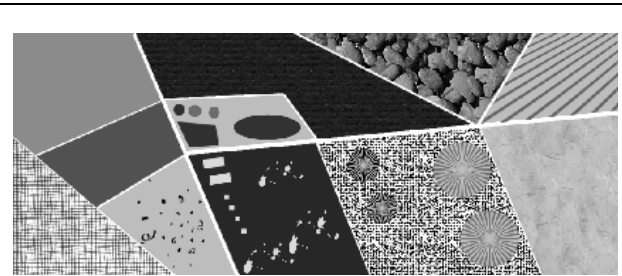


Рис. 1. Верхний слой среды

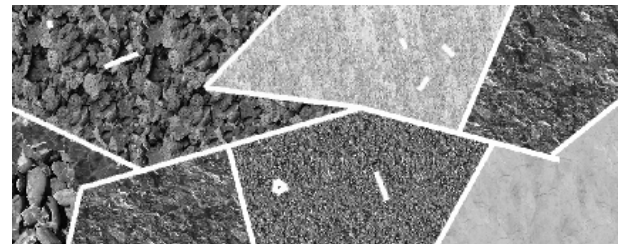


Рис. 2. Нижний слой среды

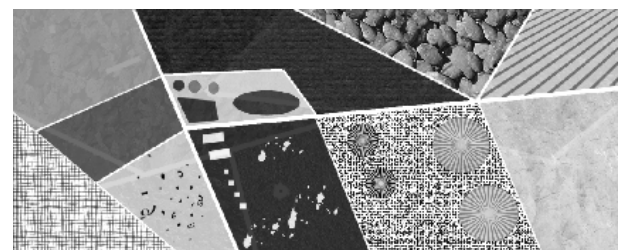


Рис. 3. Изображение поверхности при сильном затухании в зондируемой среде

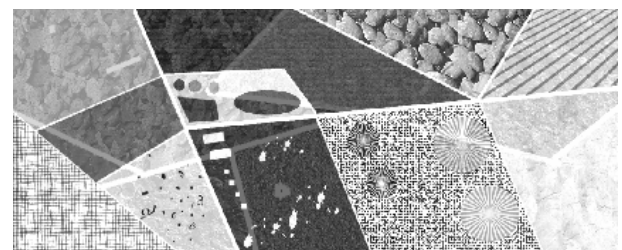


Рис. 4. Изображение поверхности при слабом затухании в зондируемой среде

Радиолокационное изображение искаженное спекл-шумом и без учета влияния диаграммы направленности представлено на рис. 5.

Необходимо определить адекватные показатели качества влияния вида весового окна на результаты разделения слоев подповерхностных сред. На основании численного моделирования, визуального сравнения и анализа показателей качества определить весовые функции позволяющие повысить качество радиолокационных изображений.

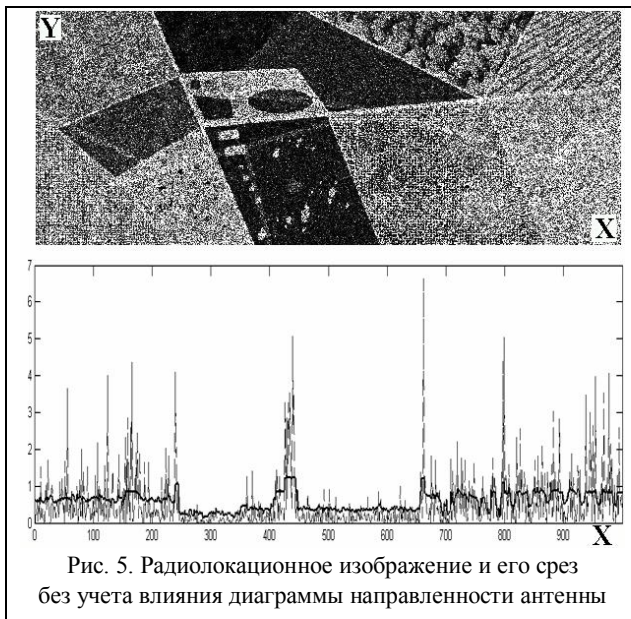


Рис. 5. Радиолокационное изображение и его срез без учета влияния диаграммы направленности антенны

Расчет показателей качества ФН и выбор модулирующей функции

Для решения поставленной задачи необходимо задать сигнал и выбрать весовое окно из множества различных весовых функций [моя статья] на основании сравнения результатов численного моделирования.

На рис. 6 представлены значения следующих критериев качества, используемых для сравнения результатов формирования РЛИ:

- минимум ширины основного лепестка по нулям $\Delta\varphi_{0\text{норм}}$;
- минимальное значение энергии в боковых лепестках $\mathcal{E}_{\text{БЛнорм}}$;
- минимальное отношение энергии в боковых лепестках к энергии в главном лепестке $\mathcal{E}_{\text{БГнорм}}$;
- максимальный уровень боковых лепестков УБЛ_{max} ;
- среднеквадратическое отклонение РЛИ от истинного по первому слою $\text{СКО}_{1\text{слой}}$;
- среднеквадратическое отклонение РЛИ от истинного по второму слою $\text{СКО}_{2\text{слой}}$;
- интегральный показатель качества

$I = \Delta\varphi_{0\text{норм}} + \mathcal{E}_{\text{БЛнорм}} + \mathcal{E}_{\text{БГнорм}} + \text{УБЛ}_{\text{max}} + \text{СКО}_{\text{н}}$,
 где $\text{СКО}_{\text{н}}$ – нормированное значение СКО по первому и второму слоям. Значение показателя оптимально при выполнении условия $I = \min$.

Нормировка критериев осуществлялась к значению параметра для ФН вида *sinc*.

На рис. 6 приведены показатели качества для 95 оконных функций (с 31 и выше – на основе атомарных функций) взятых из [2].

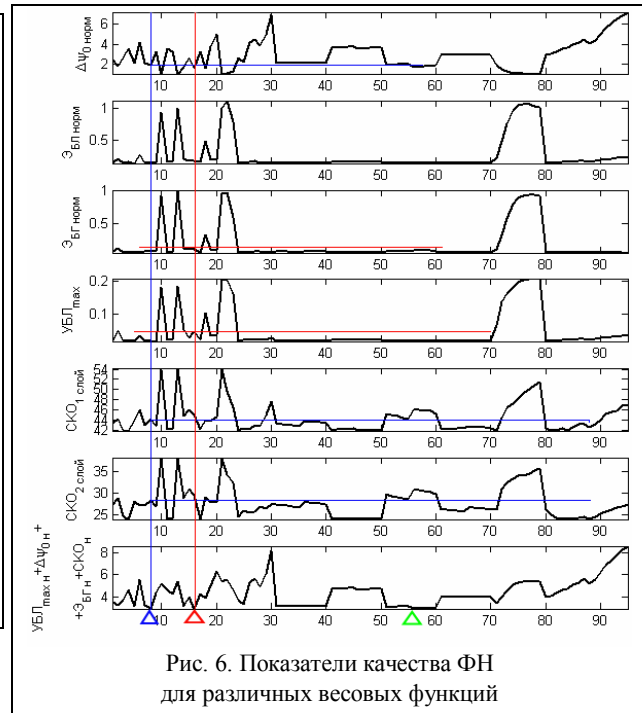


Рис. 6. Показатели качества ФН для различных весовых функций

Из анализа рис. 6 следует, что в качестве весовых функций, используемых в модуляции огибающей радиолокационного сигнала, целесообразно применять функцию № 56 из [2] функции $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$. Для удобного визуального сравнения на рис. 6 выделены окно Хэмминга № 8 (которое часто используется в радиолокационных системах различного назначения) и окно Римана № 16 (с достаточно низким интегральным показателем качества).

Моделирование формирования РЛИ без модуляции и с использованием модуляции радиолокационного сигнала

по закону $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$

В работе для простоты рассмотрено монохроматичный сигнал конечной длительности, вида:

$$x(t) = \Pi\left(\frac{t}{T/2}\right) A \cos(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

который для удобства ведения расчетов перепишем в аналитическом виде:

$$x(t) = \Pi\left(\frac{t}{T/2}\right) A \exp(j2\pi f_0 t), \quad (2)$$

где $\Pi\left(\frac{t}{T/2}\right) = \begin{cases} 1 & \text{при } |t| \leq T/2; \\ 0 & \text{при } |t| > T/2 \end{cases}$ – срезающая

функция длительностью T .

При отсутствии модуляции зондирующего импульса функцию неопределенности (ФН) сигнала можно представить в виде (рис. 7):

$$\Psi(\varphi, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x^*(t-\tau)\exp(j2\pi\varphi t)dt \right| = \left| \left(1 - \frac{2|\tau|}{T}\right) \frac{T}{2} \text{sinc}(\pi\varphi T) \right|, \quad (3)$$

где знак “*” обозначает операцию комплексного сопряжения. РЛИ, полученное в этом случае по верхнему и нижнему слоям, приведены на рис. 8.

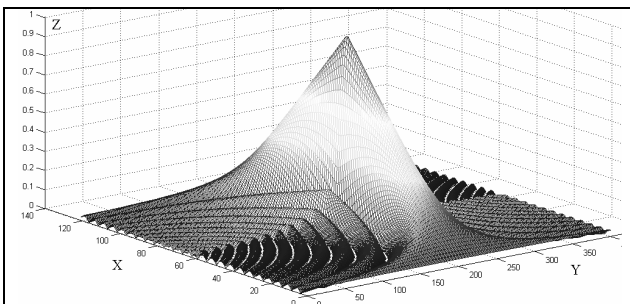


Рис. 7. ФН монохроматического сигнала с прямоугольной огибающей

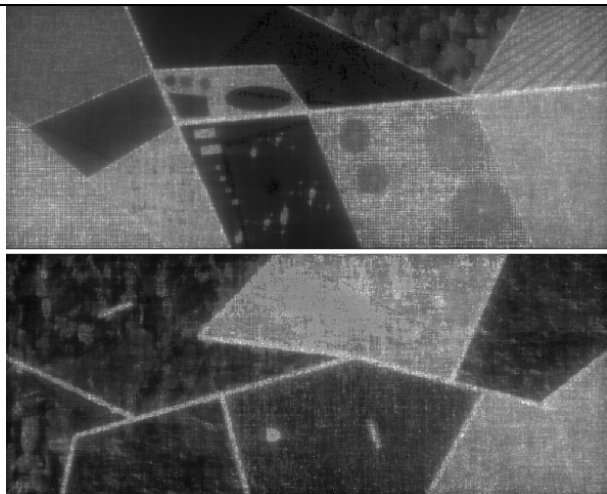


Рис. 8. Радиолокационное изображение верхнего и подповерхностного слоев полученные в результате использования немодулированного сигнала и равноамплитудного распределения поля в раскрыве антенны

В случае модуляции с помощью весовых окон не всегда удастся получить аналитическое выражение для ФН, поэтому чаще прибегают к численному моделированию. В этом случае выражение (2) будет иметь вид:

$$x(t) = W\left(\frac{t}{T/2}\right) A \exp(j2\pi f_0 t), \quad (4)$$

где $W\left(\frac{t}{T/2}\right)$ – весовая функция.

В результате анализа применения 95 оконных функций [2], определено, что наименьшее просачивание между слоями может быть получено при использовании модуляции по закону $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$. Функция $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$ получена в результате прямого произведения весового окна Гаусса и атомарной функции $\text{fup}_5^{1/20}$ [3, 4].

На рис. 9 показано ФН сигнала с огибающей $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$.

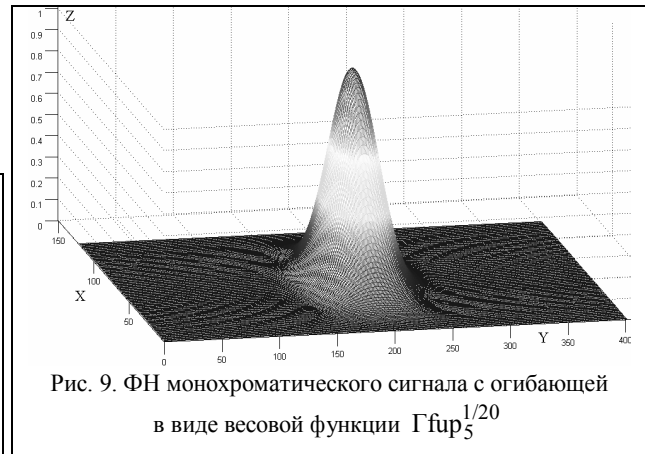


Рис. 9. ФН монохроматического сигнала с огибающей в виде весовой функции $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$

Как видно из сравнения рис. 7 и 9, боковые лепестки ФН сигнала с огибающей $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$ значительно меньше, чем для прямоугольной весовой функции.

Срезы ФН для обоих случаев по уровню 0,7 представлены на рис. 10.

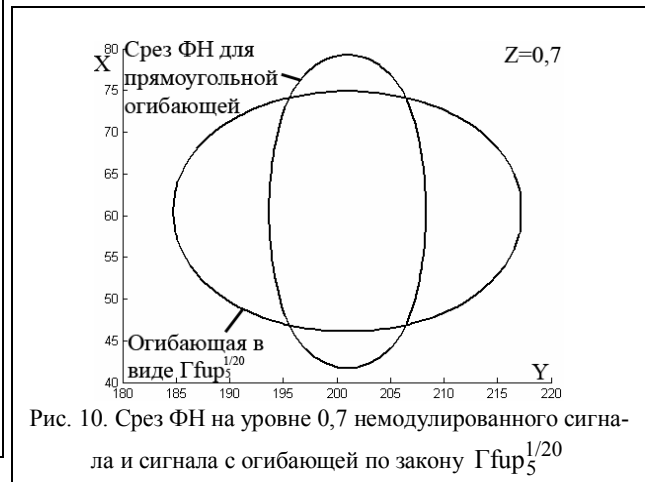


Рис. 10. Срез ФН на уровне 0,7 немодулированного сигнала и сигнала с огибающей по закону $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$

Из рис. 10 следует, что ухудшение разрешения по частоте сопровождается улучшением разрешения по дальности.

РЛИ по верхнему и нижнему слоям, полученное в результате применения окна $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$, представлены на рис. 11, из визуального анализа и показателя СКО по обоим слоям следует возможность выделения заданного слоя с достаточным качеством.

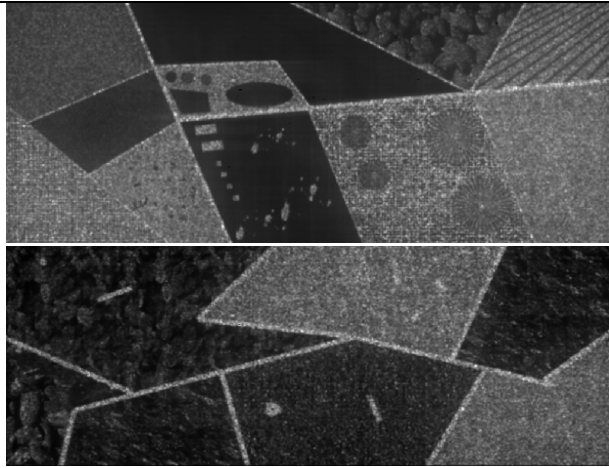


Рис. 11. Радиолокационное изображение верхнего и подповерхностного слоев полученные в результате использования модуляции сигнала и распределения поля в синтезированном раскрыве антенны по закону $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$

Выводы

Качество решения задач картографирования поверхностных и подповерхностных сред зависит от вида модулирующей функции сигнала. В случае отсутствия модуляции и зондирования среды с невысоким показателем затухания, получение РЛИ затруднено ввиду наличия эффекта просачивания по боковым лепесткам функции неопределенности сигнала. Фокусировка на заданный слой возможна при выполнении некоторых условий: применения антенных решеток с диаграммами направленности заданной формы; пространственно-временной обработки принятых сигналов. Применение такого подхода позволяет получать импульсы с заданной дальности, частично отвязываясь от мешающих слоев.

Выявлено, что «эффект просачивания» зависит от уровня боковых лепестков ФН, ширины главного лепестка ФН по нулям, энергией сосредоточенной в боковых и основном лепестке ФН.

Из анализа результатов моделирования следует, что применение немодулированных сигналов приво-

дит к значительным просачиваниям между слоями (рис. 8). Это обусловлено высоким уровнем боковых лепестков ФН такого сигнала (рис. 7). Значение уровня боковых лепестков ФН влияет на результаты разделения существеннее остальных параметров. Применение модуляции позволяет снизить уровень боковых лепестков ФН (рис. 9) и уменьшить эффект просачивания.

В работе проанализированы ФН 95 весовых окон из [2] и представлены результаты для огибающей на основе прямого произведения функции Гаусса и атомарной функции $\text{fup}_5^{1/20}$, применение которой позволяет достичь высокой развязки между необходимым и помеховым слоями. Это, прежде всего, следует из потенциальных возможностей, данной функции, полученных в виде показателей качества (рис. 6). Результаты моделирования подтверждают целесообразность использования весового окна $\Gamma \text{fup}_5^{1/20}$ в задачах картографирования поверхностных и подповерхностных слоев.

Список литературы

1. Волосяк В.К., Ксендзук А.В., Кравченко В.Ф., Кутуза Б.Г. Пространственно-временная обработка сигналов в многолучевых РСА с картографированием подповерхностных слоев почв // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2006. – № 2–3, т. 11. – С. 41-50.
2. Волосяк В.К., Павликов В.В., Севостьянов Ю.В. Использование новых окон Кравченко при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2007. – № 1 (20). – С. 11-18.
3. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям: Монография. – М.: Радиотехника, 2003. – 230 с.
4. Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Гусевский В.И. Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2005. – 512 с.

Поступила в редколлегию 22.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Э.Н. Хомяков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.