

УДК 621.396

С.М.Логвиненко

**АЛГОРИТМЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА
БИСТАТИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ
АПЕРТУРОЙ, КОТОРЫЕ ПАРАЗИТИРУЮТ НА
ТЕЛЕВИЗИОННОМ СИГНАЛЕ**

Воронежский институт высоких технологий

В работе дан анализ алгоритмов формирования радиолокационных изображений. Проведено рассмотрение приближенных и точных решений интегральных уравнений с помощью итерационного и коллокационного метода. Отмечены особенности метода определителей Фредгольма. Также приведен алгоритм получения радиолокационной информации в рамках метода адаптивной фильтрации. Рассмотрено уравнение Фредгольма второго рода и приведен алгоритм получения радиолокационной информации методом адаптивной фильтрации, выведены удобные формулы для расчета сигнала, отраженного от поверхности. Рассмотрены преобразование Фурье и равенство Парсеваля, а также функции неопределенности бистатического радара с синтезированной апертурой. Выведен зондирующий сигнал через последовательность импульсов с определенным периодом повторения. Также было выяснено, что можно проводить фильтрацию с адаптивным выравниванием амплитудно-частотной характеристики, для того, чтобы компенсировать особенности функций неопределенности телевизионных сигналов.

Ключевые слова: сигнал, радар с синтезированной апертурой, интегральное уравнение.

Радиолокационные изображения используются для решения очень широкого круга задач. Они, во-первых, могут дать дополнительную информацию о состоянии объектов вместе с данными в оптическом диапазоне, во-вторых, радиолокационные данные могут служить источником уникальной информации, которую можно получить либо только по радарным данным.

Основная задача данной работы – это получить оптимальные алгоритмы, с помощью которых в радиолокаторе строятся радиолокационные изображения (РЛИ), которые паразитируют на телевизионных сигналах, а также подобрать приемлемые параметры, чтобы построить РЛИ при наилучших вариантах, если рассматривать их с точки зрения сложности вычислений, чтобы реализовать данные алгоритмы.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ.

Как для приближенного, так и для точного решения интегральных уравнений существует огромное количество методов[1-3]. С их помощью можно решить уравнение (1), которое приведено ниже.

Ниже представлены некоторые из методов:

1. Итерационный.

Допустим $F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$, то оценка изображения, которую мы ищем, была представлена в виде:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{1}{1 + \lambda} \varepsilon_0(x, y) \quad (1)$$

Но для формирования радиолокационных изображений такая форма представленной функции не подойдет, так как она сильно отличается от δ – функции в сечении задержки для системы, которая паразитирует на сигналах ТВ вещания.

Из формулы (1) искомую оценку можно найти в виде повторяющегося процесса.

Обозначим двумерный интегральный оператор:

$$F(\varepsilon) = \iint_D F(x_1, x_2, y_1, y_2) \varepsilon(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (2)$$

И соответственно как результат повторяющегося процесса можно найти искомую оценку радиолокационного изображения:

$$\varepsilon(x, y) = \varepsilon_0(x, y) - \lambda F(\varepsilon_0) + \lambda^2 F(F(\varepsilon_0)) - \lambda^3 F(F(F(\varepsilon_0))) \dots \quad (3)$$

Существует еще и метод определителей Фредгольма, который приведет к такому же результату.

2. Метод коллокаций.

Рассмотрим уравнение:

$$\varepsilon[\varepsilon(x, y)] = \varepsilon(x, y) - \varepsilon_0(x, y) + \lambda \iint F(x_1, x_2, y_1, y_2) \zeta_n(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (4)$$

Приближенное решение запишем в виде функции

$$\zeta_n(x, y) = \varphi(x_1, x_2, A_1, A_2 \dots A_n) \quad (5)$$

Теперь подставим в уравнение:

$$\varepsilon[\zeta_n(x, y)] = \zeta_n(x, y) - \varepsilon_0(x, y) + \lambda \iint F(x_1, x_2, y_1, y_2) \zeta_n(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (6)$$

Допустим, что

$$\zeta_n(x, y) = \varphi_0(x, y) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m A_{ij} \varphi_{ij}(ix, jy) \quad (7)$$

Теперь подставим в уравнение:

$$\begin{aligned} \zeta_n(x, y) = & \varphi_0(x, y) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m A_{ij} \varphi_{ij}(ix, jy) - \varepsilon_0(x, y) + \\ & + \lambda \iint F(x_1, x_2, y_1, y_2) [\varphi_0(x, y) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m A_{ij} \varphi_{ij}] dx_1 dy_1 \end{aligned} \quad (8)$$

В соответствии с методом коллокации, невязка $\varepsilon[\zeta_n(x, y)]$ на определенном отрезке должна обращаться в ноль в точках $(x_1, y_1), (x_1, y_2), \dots, (x_n, y_{n-1}), (x_n, y_n)$. Соответственно полагается, что

$$\varepsilon[\zeta_n(x_i, y_j)] = 0 \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots n \quad (9)$$

И в итоге для того, чтобы решить уравнение, нам необходимо найти коэффициенты A_{ij} .

После описания данных методов решения, а именно уравнения Фредгольма второго рода, могут быть сделаны выводы:

- 1) Необходимость делать расчет в неограниченном пространстве – является очень трудоемкой задачей.
- 2) Похожие интегральные уравнения решаются на основе сведения к системе линейных уравнений.

АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ МЕТОДОМ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Есть другой вариант оценки РЛИ, который не требует решения немаленьких систем линейных уравнений или итерационного процесса. Разберем задачу на выбор линейного фильтра, при использовании которого будет самое близкое приближение $F(x_1, x_2, y_1, y_2) \rightarrow \delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$.

А отраженный от поверхности сигнал [4, 5] можно записать как:

$$S_2^h = \iint_D S_h(t, x, y) \varepsilon(x, y) dx dy + n_2^h(t), \quad (10)$$

где $S_h(t, x, y) = \int G_2(t, x, y) S_{tv}(t - \tau_2(t, x, y)) h(t-t') dt', \quad (11)$

Следовательно:

$$F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \int S_h(t, x, y) Sh(t, x, y) dt. \quad (12)$$

Теперь немного упростим данную задачу. Допустим, что в области формирования радиолокационного изображения $G_2(t_1, x, y) = 1$, так как это характернее для диапазона УКВ. Следовательно:

$$S_h(t, x, y) = \int S_{tv}(t - \tau_2(t, x, y)) h(t-t') dt = S_h(t - \tau_2(t, x, y)), \quad (13)$$

где

$$S_h(t) = \int S_{tv}(t - \tau_2(t)) h(t-t') dt, \\ F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \int S_h(t - \tau_2(t, x, y)) * S_h(t - \tau_2(t, x, y)) dt. \quad (14)$$

Обратим внимание также на то, что интервал обработки информации $(t_1 - t_2)$ всегда будет иметь N участков, длительность которых будет T , и функция $\tau_2(t, x, y)$ на этих участках считается кусочно-постоянной, соответственно следующее выражение можно считать справедливым:

$$F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \sum_{i=0}^{N-1} \int_{iT}^{(i+1)T} S_h(t - \tau_2(t_i, x_1, y_1)) * S_h(t - \tau_2(t_i, x, y)) dt \quad (15)$$

Для преобразования Фурье можно воспользоваться равенством Парсеваля, тогда получается:

$$F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} |S_i(i\omega)|^2 |H_i(i\omega)|^2 e^{i(\omega - \omega_0)(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y))} d\omega. \quad (16)$$

На временном интервале $(iT, (i+1)T)$ в данном выражении комплексной огибающей телевизионного сигнала является - $|H_i(i\omega)|$, а

передаточная функция, фильтра, который мы ищем на несущей частоте – $H(j\omega)$, т.е.

$$H(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j(\omega - \omega_0)t} dt. \quad (17)$$

Допустим, что выполняется следующее условие

$$\frac{|S_i(j\omega)| |H(j\omega)|}{\mu(\omega)} = 1, \quad (19)$$

где $\mu(\omega)$ – заданная весовая функция.

$$\begin{aligned} F(x_1, x_2, y_1, y_2) &= \frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j(\omega - \omega_0)(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y))} d\omega = \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} \mu(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y)) e^{-j\omega_0(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y))} \end{aligned} \quad (20)$$

Очевидно, что это выражение и есть функция неопределенности бистатического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) и в этой функции последовательность импульсов с периодом повторения T и будет являться зондирующим сигналом.

Следовательно, мы выяснили, что можно проводить фильтрацию с адаптивным выравниванием АЧХ, для того, чтобы компенсировать особенности функций неопределенности ТВ сигналов.

В данной ситуации алгоритм оценивания будет выглядеть таким образом:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \int G_2(t_1, x, y) S_h(t_1 - \tau^2(t_1, x, y)) S_2^h(t_1) dt_1 \quad (20)$$

Но, в соответствии с корреляционной функцией корректирующего фильтра, после того, как проведена фильтрация, адаптивный шум окрашивается [6].

$$B_{n_2^h}(t_1 - t_2) = \frac{N_0}{4\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \int \frac{|H(i\omega)|^2}{\mu^2(\omega)} \exp(i\omega(t_1 - t_2)) d\omega \quad (21)$$

А это значит, что данный алгоритм менее помехоустойчивый относительно оптимального алгоритма (3).

Чтобы построить оценки (3) или (21) должно быть известно $S_{tv}(t)$. А получить $S_{tv}(t)$ можно из сигнала прямого канала $S_1(t)$, этот сигнал по факту и есть оценка максимального правдоподобия сигнала, который мы ищем. При оценке характеристик распространения сигналов используются соответствующие методы [7, 8].

ВЫВОДЫ.

Таким образом, в результате проведенного исследования:

- были представлены варианты решения интегрального уравнения Фредгольма – на основе метода коллокаций оно сводится к системе линейных уравнений;

- был предложен альтернативный алгоритм построения оценки РЛИ, основанный на выборе адаптивного фильтра, который сводит функцию неоправданности сигнала к дельта-функции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснов М. Л. Интегральные уравнения. / М.Л.Краснов // М.: Наука. 1975. 304с.
2. Полянин А.Д. Справочник по интегральным уравнениям. / А.Д.Полянин, А.В.Манжиров // М.: Физматлит, 2003, 608 с.
3. Преображенский А.П. Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн / А.П.Преображенский // Воронеж, Издательство: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2007, 248 с.
4. Львович Я.Е. Решение задач оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн на дифракционных структурах при их проектировании / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2010. № 6. С. 255-256.
5. Преображенский А.П. Аппроксимация характеристик рассеяния электромагнитных волн элементов, входящих в состав объектов сложной формы / А.П.Преображенский, Ю.П.Хухрянский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 15-16.
6. Власенко Г.И. Теория восстановления сигналов. / Г.И.Власенко // М.: Советское радио. 1979. 272с.
7. Даница А.И. Модели каналов передачи данных / А.И.Даница, В.Н.Кострова // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 2(17). С. 86-90.
8. Максимова А.А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А.А.Максимова, А.Г.Юрочкин

// Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1(16). С. 53-56.

S.M.Logvinenko

THE ALGORITHMS THAT FORM THE IMAGE ON THE BISTATIC SYNTHETIC APERTURE RADAR, WHICH ARE PARASITIC ON THE TELEVISION SIGNAL

Voronezh Institute of High Technologies

In the paper the analysis of the algorithm of forming radar images. Reviewed approximate and exact solutions of integral equations using iterative and collocation method. Marked features of the method of Fredholm determinants. Also the algorithm of receiving radar data in the framework of adaptive filtering. Considered a Fredholm equation of the second kind and the algorithm for obtaining the radar information by a method of adaptive filtering are derived a convenient formula for calculating the signal reflected from the surface. Considered the Fourier transform and equality Parseval and ambiguity function of the bistatic synthetic aperture radar. Launched a sounding signal using a sequence of pulses with a certain repetition period. It was also found that it is possible to filter data by adaptive equalization of amplitude-frequency characteristics, in order to compensate for features of uncertainty of television signals.

Keywords: signal, radar with synthetic aperture, integral equation.

REFERENCES

1. Krasnov M. L. Integral'nye uravneniya./ M.L.Krasnov // M.: Nauka. 1975. 304p.
2. Polyanin A.D. Spravochnik po integral'nym uravneniyam. / A.D.Polyanin, A.V.Manzhirov // M.: Fizmatlit, 2003, 608 p.
3. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie i algoritmizatsiya analiza difraktsionnykh struktur v SAPR radiolokatsionnykh antenn / A.P.Preobrazhenskiy // Voronezh, Izdatel'stvo: Izdatel'sko-poligraficheskiy tsentr "Nauchnaya kniga", 2007, 248 p.
4. L'vovich Ya.E. Reshenie zadach otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln na difraktsionnykh strukturakh pri ikh proektirovanii / Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2010. No. 6. pp. 255-256.
5. Preobrazhenskiy A.P. Approksimatsiya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln elementov, vkhodyashchikh v sostav ob"ektov slozhnoy formy / A.P.Preobrazhenskiy, Yu.P.Khukhryanskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. Vol. 1. No. 8. pp. 15-16.

6. Vlasenko G.I. Teoriya vosstanovleniya signalov. / G.I.Vlasenko // M.: Sovetskoe radio. 1979. 272p.
7. Danitsa A.I. Modeli kanalov peredachi dannykh / A.I.Danitsa, V.N.Kostrova // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 2(17). pp. 86-90.
8. Maksimova A.A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A.A.Maksimova, A.G.Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No.1(16). pp. 53-56.