

УДК 537.86

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В МЕТОДЕ ИРП ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.С. Алсаткин, А.В. Медведев, Д.С. Кушнарев

RESEARCH INTO POSSIBILITY FOR APPLICATION OF COMPLEX SIGNALS IN THE IS METHOD BY MATHEMATICAL MODELING

S.S. Alsatkin, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev

В статье излагаются особенности применения сложных сигналов в методе ИРП. Описывается исследование возможности применения сложных сигналов в методе ИРП путем математического моделирования. Приводятся графики результатов моделирования.

In article features of application of difficult signals in method IS are stated. Research of possibility of application of difficult signals in method IS by mathematical modelling is described. Schedules of results of modelling are resulted.

Введение

Метод некогерентного рассеяния является наиболее информативным из существующих методов исследования ионосферы, позволяющим определять большое число параметров ионосферы в широком диапазоне высот. Аппаратура для исследования ионосферы методом ИРП представляет собой дорогой и сложный технический комплекс, состоящий из мощных передатчиков, антенн с большими апертурными размерами, чувствительных приемников и сложных систем контроля, регистрации и управления. В настоящее время в мире существует не более десятка установок, ведущих регулярную научно-исследовательскую работу этим методом. Единственным РНР в России является Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР), который входит в мировую сеть РНР.

На ИРНР для исследования ионосферы применяется прямоугольный импульс, длительность которого выбирается, исходя из предполагаемой максимальной электронной концентрации на период измерения. Данного типа импульсы имеют низкое разрешение по высоте, которое не удовлетворяет современным требованиям в исследовании ионосферы (например, для изучения спорадических слоев в области Е-слоя). В связи с чем встает задача о повышении разрешающей способности по высоте в экспериментах на ИРНР. Для этого можно использовать следующие методы:

- уменьшить длительность зондирующего сигнала, представляющего собой гладкий прямоугольный импульс;
- использовать сложные сигналы;

Однако при простом уменьшении длительности зондирующего импульса проявляется нежелательный эффект в виде уменьшения отношения сигнал/шум. В то же время применение сложных сигналов позволяет достичь хорошей разрешающей способности и не ухудшить отношение сигнал/шум [1–4].

Изначально сложные сигналы разрабатывались для радиолокации, где цель считается точечной и имеет вполне определенные отражающие свойства. Применением данного типа сигналов в радиолокации достигается улучшение разрешающей способности по дальности и точность измерения дальности до цели по сравнению с прямоугольным импульсом

той же самой длительности и амплитуды. Обработка сложных сигналов осуществляется с помощью согласованных фильтров. Применение согласованных фильтров подразумевает, что форма принятого сигнала является копией излученного. Чем ближе форма отраженного сигнала к форме излученного, тем точнее результат на выходе фильтра. В радиолокации, как правило, данное требование удовлетворяется для неподвижных целей и, после устранения доплеровского сдвига, для движущихся целей.

В ионосферных наблюдениях по сравнению с радиолокационными задачами, имеются характерные особенности, к которым относятся:

- стохастический характер сигналов;
- пространственно-распределенный характер радиолокационного объекта – ионосферной плазмы – и связанная с этим непрерывность сигналов вдоль временной развертки, несмотря на импульсное зондирование;
- низкое отношение сигнал/шум на входе приемника;
- наличие чисто статистической связи параметров сигнала с параметрами исследуемой ионосферной плазмы;
- многопараметрический характер этой связи, при котором большое число ионосферных параметров одновременно влияет на характеристики сигналов;
- конечное время корреляции среды [1, 5].

Изменение свойств среды со временем приводит к изменению формы отраженного сигнала. Чем быстрее эти изменения за период равный длительности излучаемого импульса, тем сильнее искажение в форме отраженного сигнала. Время, в течение которого изменениями в форме принятого сигнала можно пренебречь, является временем корреляции среды. Поэтому, применяя сложные сигналы в ионосферных наблюдениях, необходимо учитывать данные особенности.

На большинстве РНР используется волна, поляризованная по кругу, вследствие чего вращение плоскости поляризации не влияет на полную мощность сигнала. В силу особенностей антенной системы ИРНР, передается и принимается только линейно поляризованный сигнал. Электромагнитная волна, распространяясь в ионосферной плазме, на-

ходящейся во внешнем магнитном поле Земли, испытывает влияние эффекта Фарадея. За счет эффекта Фарадея происходит вращение плоскости поляризации волны, приводящее к замиранию НР-сигнала на выходе антенной системы. Данный эффект прежде всего сказывается на появлении отличного от нуля значения профиля мощности в точках замирания сигнала. По этой причине для восстановления электронной концентрации из полученного профиля используется процедура обращения свертки, которая имеет неоднозначное решение [5].

Использование сложных сигналов на ИРНР требует внедрения новых алгоритмов обработки принятого сигнала и использования новых принципов формирования излучаемых сигналов. В 2004–2007 гг. на ИРНР проводилась модернизация основных блоков. Большое внимание было уделено системе формирования зондирующих сигналов, приемной аппаратуре и системе регистрации и обработки. Использование цифровых синтезаторов радиочастот вместе с компьютерным управлением позволяет формировать сложные фазоманипулированные сигналы для любых режимов работы. В перспективе рассматривается вопрос об использовании в качестве модулирующей последовательности кодов Баркера.

С учетом особенностей ионосферы как радиолокационной цели (конечное время корреляции среды) и антенной системы ИРНР необходимо оценить, как параметры зондирующего сигнала (вид кодирующей последовательности, его длительность) влияют на качество восстановления профиля мощности. Определить оптимальные параметры сигнала, который более качественно восстанавливает исходный профиль фарадеевских вариаций, можно следующими способами:

- непосредственно из эксперимента,
- при помощи моделирования.

По полученным в ходе эксперимента профилям мощности для различных зондирующих импульсов, нельзя однозначно сказать, какой из зондирующих сигналов наилучшим образом восстанавливает реальный профиль мощности, поскольку последний неизвестен.

Моделирование отклика ионосферы на зондирующий сигнал позволяет задавать все основные параметры, а значит, устраняет недостаток эксперимента – отсутствие искомого профиля мощности. Сравнивая отклик модели с заданным профилем мощности можно однозначно определить оптимальные параметры сигнала.

Данная статья посвящена описанию исследования путем математического моделирования возможностей применения сложных сигналов в методе НР.

Описание модели

Предлагаемая модель описывает ионосферу с радиофизической точки зрения и не претендует на описание происходящих в ней физических процессов. В данной модели имитируется отклик ионосферы на зондирующий сигнал. В качестве входных параметров задаются следующие параметры: форма огибающей зондирующего импульса, форма спектра мощности и вид фарадеевских вариаций. Последние

два параметра описывают физические свойства ионосферы. В приведенных ниже рассуждениях ионосфера рассматривается как линейная система.

Предполагается, что посылаемый импульс рассеивается очень тонким слоем ионосферы (т.е. распределение электронной концентрации по высоте становится дельта-функцией) [6]. Чтобы получить реальный профиль электронной концентрации, эти результаты должны образовывать свертку с действительным распределением электронной концентрации. С учетом того, что параметры ионосферы в рассматриваемом тонком слое изменяются со временем, рассеянный сигнал от него запишется как $b(t)f(t)$, где $b(t)$ – зондирующий сигнал. Типичные представления фазовой манипуляции для 7-и и 11- элементных кодов Баркера и вид $b(t)$ приведены на рис. 1 и 2.

В дальнейших рассуждениях для простоты считаем, что начальная фаза излучаемого сигнала равна нулю (это означает, что в этом излучаемом сигнале присутствует только одна квадратура), и рассматриваем принятый сигнал уже с устраненной высокочастотной составляющей. В этом случае $b(t)$ является просто квадратурой сигнала, значения которой положительный или отрицательный в соответствии с фазой кода (фаза для кодов Баркера принимает значения либо 0°, либо 180°).

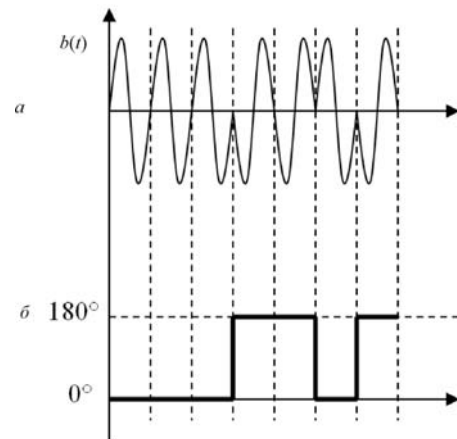


Рис. 1. Фазовая манипуляция семиэлементным кодом Баркера: а – форма зондирующего сигнала; б – вид кодовой манипуляции.

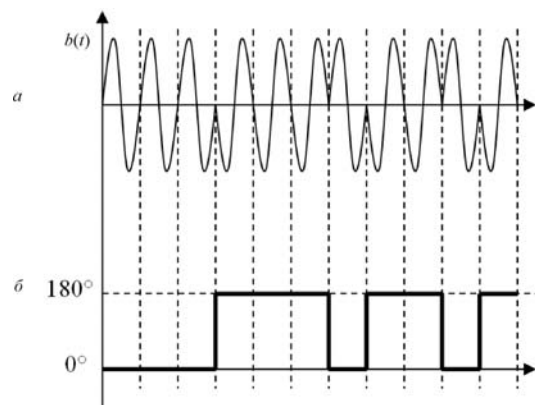


Рис. 2. Фазовая манипуляция одиннадцатиэлементным кодом Баркера: а – форма зондирующего сигнала; б – вид кодовой манипуляции.

Функция $f(t)$ описывает процессы, происходящие в рассматриваемом тонком слое. Затем сигнал проходит через согласованный фильтр, который считается идеальным. Выходная реакция фильтра запишется в виде

$$G(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} b(t_1) f(t_1) b(t_1 - t) dt_1. \quad (1)$$

Запишем $f(t)$ в спектральной области:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2)$$

тогда выходная реакция фильтра запишется как

$$G(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} b(t_1) b(t_1 - t) \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t_1} d\omega dt_1, \quad (3)$$

где

$$S(\omega) = |S(\omega)| e^{-j\phi}. \quad (4)$$

Зависимость $|S(\omega)|$ от частоты изображена на рис. 3.

Как было сказано выше, $S(\omega)$ является случайной функцией. Данный факт можно легко учесть, если в выражении (4) считать случайной величиной, например, фазу.

При проведении наблюдений на ИРНР все данные представляются в цифровом виде и обработка ведется уже с оцифрованными данными. Исходя из этого, представим выражение (3) также в цифровом виде:

$$G(t_i) = \sum_{k=0}^m b(t_{1k}) b(t_{1k} - t_i) \sum_{l=-n}^n |S(\omega_l)| e^{j\omega_l t_{1k}} e^{-j\phi_l} \quad (5)$$

или

$$G(t_i) = \sum_{l=-n}^n \sum_{k=0}^m b(t_{1k}) b(t_{1k} - t_i) |S(\omega_l)| e^{j\omega_l t_{1k}} e^{-j\phi_l}. \quad (6)$$

Полный сигнал, полученный от всех слоев, будет равен

$$G(t) = \sum_{i=0}^P G(t_i) = \sum_{i=0}^P \sum_{l=-n}^n \sum_{k=0}^m b(t_{1k}) b(t_{1k} - t_i) \times |S(\omega_l)| e^{j\omega_l t_{1k}} e^{-j\phi_l}, \quad (7)$$

где P – число слоев. Последнее выражение описывает ионосферу как линейную систему, все физические процессы, происходящие в ней, описываются функцией $S(\omega)$. Единственное, что не учтено в уравнении (7), это фарадеевские вариации [6, 7]. Экспериментальный профиль фарадеевских вариаций изображен на рис. 4.

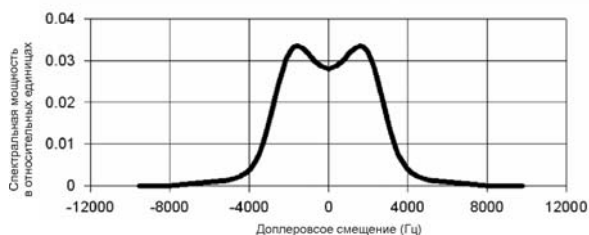


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности мощности от частоты.

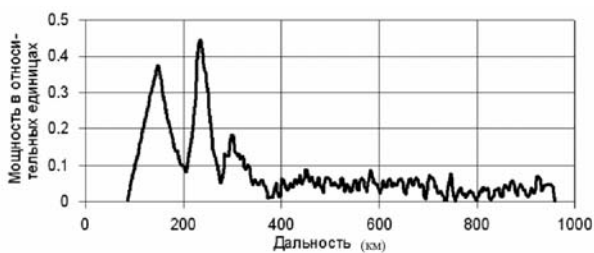


Рис. 4. Типичный профиль фарадеевских вариаций.

Для учета вклада фарадеевских вариаций вводится множитель $H(t)$, который связывает определенный слой с определенным значением фарадеевских вариаций. С учетом этого выражение принимает вид

$$G(t) = \sum_{i=0}^P G(t_i) = \sum_{i=0}^P \sum_{l=-n}^n \sum_{k=0}^m H(t_i) b(t_{1k}) b(t_{1k} - t_i) \times |S(\omega_l)| e^{j\omega_l t_{1k}} e^{-j\phi_l}. \quad (8)$$

Общая структура модели, созданная на основе уравнения, изображена на рис. 5.

Объем ионосферы, находящейся в секторе обзора ИРНР, в модели представлен в виде тонких слоев, распределенных по высоте. В методе НР предполагается, что рассеяние происходит в основном на свободных электронах в неоднородностях электронной плотности, связанных с флуктуациями диэлектрической проницаемости. Электроны в модели представляются рассеивателями. Число рассеивателей зависит от числа заданных доплеровских смещений, которые определяют спектр рассеянного сигнала. Каждый рассеиватель имеет свое доплеровское смещение. Доплеровское смещение задается функцией распределения мощности спектра сигнала НР либо аналитически, либо из эксперимента. Помимо доплеровских частот, задается и их мощность.

В реальном эксперименте, кроме полезного сигнала, всегда присутствует шум. Основными компонентами шума являются тепловой шум приемной системы и космический шум (шум неба). В данной работе при моделировании учитывается только тепловой шум приемной системы. Для построения модели применяется следующий алгоритм добавления шума:

- задается требуемое отношение сигнал/шум;
- генерируются два независимых узкополосных шума (для каждой квадратуры), которые затем добавляются к реализации.

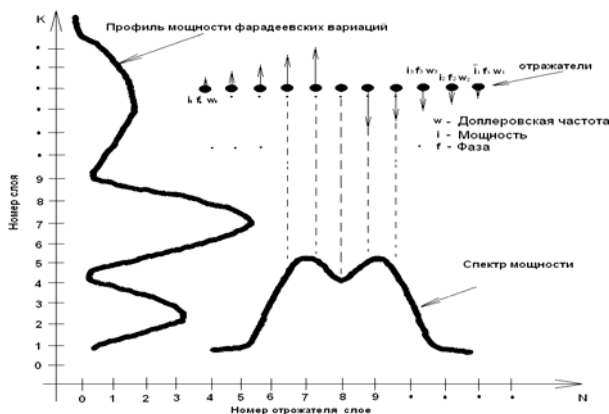


Рис. 5. Общая структура модели.

Для каждой реализации генерируется отдельно свой шум, тем самым моделируется реальный процесс регистрации сигнала. Математическое описание алгоритма приводится ниже.

Пусть $x(n)$ имеет равномерное распределение в интервале $(0, 1)$ с плотностью вероятности $p(x)$ [4]. Введем последовательность $y(n)$, связанную с последовательностью $x(n)$ соотношением

$$y(n) = \sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{1}{x(n)}\right)}. \quad (9)$$

Плотность вероятности одной величины связана с плотностью вероятности другой величины соотношением

$$p(y) = p(x) \left| \frac{dx}{dy} \right|. \quad (10)$$

Из (10) выразим $x(n)$:

$$x(n) = e^{-\frac{y^2(n)}{2\sigma^2}}. \quad (11)$$

Возьмем производную по $y(n)$ в выражении (12) и получим, что $p(y)$ есть

$$p(y) = p(x) \frac{y(n)}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2(n)}{2\sigma^2}}. \quad (12)$$

Так как $x(n)$ распределена равномерно на отрезке $(0, 1)$, то $p(x)=1$,

$$p(y) = \frac{y(n)}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2(n)}{2\sigma^2}}. \quad (13)$$

Уравнение (14) является рэлеевским распределением. Введем новые переменные:

$$A(n) = y(n) \cos(\varphi), \quad (14)$$

$$B(n) = y(n) \sin(\varphi). \quad (15)$$

Плотность вероятности для новых переменных выразится следующим образом:

$$p(A) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2}} e^{-\frac{A^2(n)}{2\sigma^2}}, \quad \bar{A} = 0; \quad (16)$$

$$p(B) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2}} e^{-\frac{B^2(n)}{2\sigma^2}}, \quad \bar{B} = 0. \quad (17)$$

Таким образом, имеются две квадратуры шума - A и B - и две квадратуры сигнала - a и b . Результирующий сигнал с учетом шума, также в квадратурах, запишется как

$$A_{рез}(n) = A(n) + a(n), \quad (18)$$

$$B_{рез}(n) = B(n) + b(n). \quad (19)$$

Результаты, полученные в процессе моделирования

На рис. 6 показаны три графика спектра мощности с различными значениями времени корреляции среды: 100 мкс (толстой линией), 200 мкс (тонкой линией) и 500 мкс (штриховой линией), данные спектры мощности являются одним из основных входных параметров модели. Отдельная реализация, полученная в ходе мо-

делирования, для фазоманипулированного (ФМ) сигнала с кодом Баркера равным 7 для времени корреляции равной 100 мкс, представлена на рис. 7. Результаты накопления мощности из тысячи реализаций представлены на рис. 8, 9, 10 и 11.

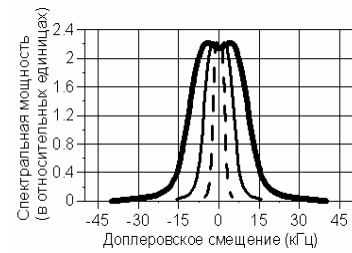


Рис. 6. Спектральная мощность.

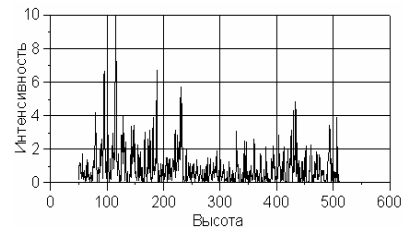


Рис. 7. ФМ (7) = 112 мкс; $t_{кор ср} = 100$ мкс.

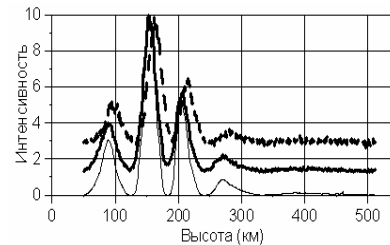


Рис. 8. ПИ: $t_{длит им} = 112$ мкс; ФМ (7): $t_{длит им} = 112$ мкс; $t_{кор ср} = 100$ мкс.

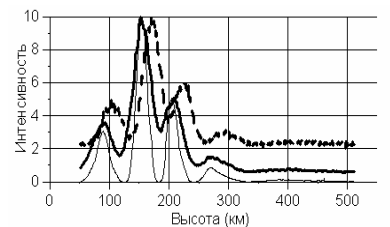


Рис. 9. ПИ: $t_{длит им} = 224$ мкс; ФМ (7): $t_{длит им} = 224$ мкс; $t_{кор ср} = 100$ мкс.

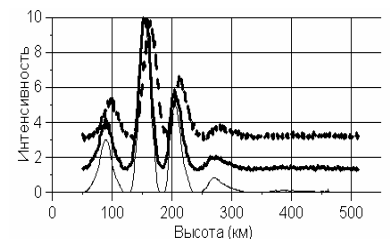


Рис. 10. ПИ: $t_{длит им} = 112$ мкс; ФМ (7): $t_{длит им} = 112$ мкс; $t_{кор ср} = 500$ мкс.

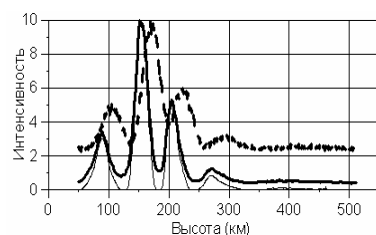


Рис. 11. ПИ: $t_{длит им} = 224$ мкс; ФМ (7): $t_{длит им} = 224$ мкс; $t_{кор ср} = 500$ мкс.

Тонкой линией изображен исходный профиль мощности, который является вторым входным параметром модели, толстой линией изображен отклик модели на фазоманипулированный сигнал (ФМ), штриховой линией изображен отклик на прямоугольный импульс (ПИ). ФМ(7) – фазоманипулированный 7-элементным кодом Баркера сигнал; ПИ – прямоугольный импульс; $t_{\text{длит им}}$ – общая длительность импульса; $t_{\text{кор ср}}$ – время корреляции среды;

Анализ полученных результатов показывает, что для $t_{\text{кор ср}} = 100$ мкс, при увеличении длительности импульса, происходит: увеличение расстояния между минимумами фарадеевских вариаций и уровнем шума и сдвиг профиля мощности относительно исходного (заданного). Этот сдвиг наиболее выражен для прямоугольного импульса и в меньшей степени — для сложного сигнала. В то же время, если рассматривать одну и ту же общую длительность сигнала, то с увеличением времени корреляции среды происходит уменьшение расстояния между минимумами фарадеевских вариаций и уровнем шума для сложных сигналов, в то время как для прямоугольного импульса никаких изменений не происходит. Для $t_{\text{кор ср}} = 500$ мкс с увеличением длительности импульса качество восстановления профиля мощности при использовании сложного сигнала не ухудшается. Это объясняется тем, что при маленьком времени корреляции среды разрушение корреляционной функции сигнала происходит быстрее, чем при большом. Сложные сигналы также обеспечивают выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с прямоугольным импульсом.

В качестве заключения отметим основные результаты, полученные при моделировании:

1. При общем увеличении длительности прямоугольного импульса в профиле мощности происходит:

- увеличение расстояния между минимумами фарадеевских вариаций и уровнем шумов;
- смещение полученного профиля относительно исходного (это смещение тем больше, чем длиннее зондирующий импульс).

Такие же искажения в профиле мощности наблюдаются и в реальных экспериментах, что позволяет говорить об адекватности результатов, выдаваемых моделью.

2. Результаты моделирования со сложными сигналами показали, что они дают выигрыш по сравнению с обычным прямоугольным импульсом, по таким параметрам, как отношение сигнал/шум и качество восстановления фарадеевских вариаций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 06-05-64577.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nygren T. Introduction to incoherent measurements.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
3. Свистов В. М. Радиолокационные сигналы и их обработка. М.: Сов. радио, 1977. 448 с.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: //Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». М.: Высш. шк., 2000. 462 с.
5. Шпынев Б. Г. Методы обработки сигналов некогерентного рассеяния с учетом эффекта Фарадея: Автореферат кант. дис. ИСЗФ, 2000. 142 с.
6. Gray R.W., Farley D.T. Theory of incoherent-scatter measurements using compressed pulses // Radio Sci. 1973. V. 8. N. 2. P. 123–131.
7. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука. 1979. 384 с.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск.