

УДК 537.86

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ НА КАЧЕСТВО
ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫХ
ИЗ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

С.С. Алсаткин, А.В. Медведев

**SIMULATING THE INFLUENCE OF THE FARADAY EFFECT ON QUALITY OF
IONOSPHERIC PARAMETERS EXTRACTED FROM THE INCOHERENT SCATTER SIGNAL**

S.S. Alsatkin, A.V. Medvedev

Приводятся оптимальные характеристики сигнала, способного качественно восстанавливать исходный профиль мощности для различных значений электронной концентрации, отношения T_e/T_i .

Optimal characteristics of the signal for high quality restoring of the profile of as well as for different value of electron density and ratio T_e/T_i .

Введение

Исследования процессов в ионосфере обусловлены необходимостью дальнейшего развития представлений о характере солнечно-земных связей и поведении ближнего космоса, усовершенствования используемых моделей и увеличения надежности анализа состояния среды при различных гелио- и геофизических условиях.

Поэтому в современных исследованиях процессов в ионосфере на первое место выдвигаются требования повышения точности измерения параметров ионосферной плазмы и улучшения разрешающей способности измерений. В первую очередь такие требования связаны со стремлением исследовать с хорошей детальностью нижние слои ионосферы (E и D).

Точность измерения связана с отношением сигнал/шум: чем оно выше, тем выше точность. При использовании согласованной обработки отношение сигнал/шум на выходе фильтра при условии, что на входе действует белый шум, определяется выражением $q_{\max}^2 = E_s / W_0$ [Гоноровский, 1971; Кобзарева, 1969]. Из формулы видно, что отношение сигнал/шум при согласованной обработке зависит только от энергии излучаемого сигнала и не зависит от его формы, т. е. чтобы повысить точность измерения, нужно увеличить энергию излучаемого сигнала, однако в случае прямоугольного импульса при этом ухудшится разрешающая способность измерений, о которой будет говориться ниже.

Разрешающая способность по дальности в радиолокации представляется как минимальное расстояние между двумя неподвижными точечными целями, при котором отраженные от них сигналы можно различить в присутствии шума. В случае отсутствия шума и при известной форме излучаемого сигнала отраженные сигналы от двух неподвижных точечных целей будут полностью выделяться из сложного отраженного сигнала независимо от того, насколько близко друг к другу расположены цели. Однако шум присутствует в любых измерениях.

В качестве меры различимости вводят понятие функции неопределенности по дальности, которая выражается формулой

$$c(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} u^*(t)u(t-\tau)dt,$$

где $u(t)$ – огибающая отраженного сигнала от первой цели; $u(t-\tau)$ – огибающая отраженного сигнала от второй цели; а τ – время запаздывания сигнала от второй цели относительно сигнала от первой цели [Кобзарева, 1969; Свистов, 1977].

Функция $|c(\tau)|$ имеет максимальное значение при $\tau=0$, когда цели неразличимы, и спадает при увеличении τ (при достижении определенного значения τ_0 цели становятся полностью различимыми). Разрешающая способность будет тем лучше, чем уже будет функция $|c(\tau)|$, т. е. будет иметь острый пик при $\tau=0$ и быстро спадать до очень малого значения при увеличении τ в обе стороны от 0. Для прямоугольного импульса улучшение разрешающей способности достигается уменьшением его длительности, однако такое действие приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум, что автоматически влечет снижение разрешающей способности. Получается замкнутый круг. К тому же сигнал некогерентного рассеяния является очень слабым шумоподобным сигналом и уменьшение отношения сигнал/шум отрицательно сказывается на точности измерения параметров.

В радиолокационной технике с целью повышения разрешающей способности в измерении дальности до объекта и сохранения точности измерения (обеспечить приемлемое отношение сигнал/шум) достаточно давно используются сложные сигналы. Математически сложный сигнал можно представить в виде формулы $A(t)e^{-i\omega(t)t+i\varphi(t)}$, в которой один или несколько параметров ($A(t)$, $\omega(t)$ или $\varphi(t)$) изменяются по определенному закону. Если дан закон изменения для $A(t)$, тогда имеем дело с амплитудной модуляцией; для $\omega(t)$ – с частотной модуляцией; для $\varphi(t)$ – с фазовой модуляцией. Сложные сигналы позволяют улучшить разрешающую способность, не ухудшая при этом отношения сигнал/шум [Кобзарева, 1969; Свистов, 1977; Тихонов, 1983].

Использование сложных сигналов в ионосферных исследованиях не является совершенным методом, поскольку свойства ионосферы изменяются во времени и пространстве. Возможность использования сложных сигналов на радаре некогерентного рассеяния в Аресибо, в частности кодов Баркера, исследовалась в работе [Gray, Farley, 1973]. В этой работе

показано, что общая длительность сложного сигнала, при которой не происходит значительных искажений в его структуре, должна быть меньше временного расстояния до первого нуля, образуемого пересечением с осью абсцисс автокорреляционной функции (АКФ) рассеивающей среды. Авторы предполагали, что посылаемый импульс рассеивается очень тонкими слоями. Результаты рассеяния сигнала на этих слоях образуют свертку с действительным распределением электронной плотности. Вследствие временных изменений слоя рассеянный сигнал от слоя записан как

$$b(t)f(t),$$

где $b(t)$ – излучаемый сигнал, $f(t)$ – функция, описывающая поведения слоя со временем. На выходе согласованного фильтра принятый сигнал запишется как

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

Так как ионосферный сигнал представляет собой случайный процесс, то берутся средние по ансамблю значения мощности на выходе приемника:

$$\begin{aligned} \langle |G(t)|^2 \rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} b(t_1)b(t_2) \langle f(t_1)f^*(t_2) \rangle \times \\ &\times b(t_1-t)b(t_2-t)dt_1dt_2. \end{aligned}$$

Если положим $t_2=t_1+\tau$ и введем обозначение

$$\langle f(t_1)f^*(t_1+\tau) \rangle = \rho(\tau),$$

где $\rho(\tau)$ – АКФ некогерентного рассеяния, то

$$\langle |G(t)|^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\tau)F(t, \tau)d\tau,$$

где $F(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} b(t_1)b(t_1+\tau)b(t_1-t)b(t_1+\tau-t)dt_1$ – функция, зависящая только от выбранного кода. На основе анализа функции $\langle |G(t)|^2 \rangle$ для различных $\rho(\tau)$ и видов кода Баркера в работе [Gray, Farley, 1973] был сделан вывод о том, что наилучшим кодом является 13-элементный код Баркера.

Радар некогерентного рассеяния в Аресибо отличается от Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). ИРНР имеет такую особенность, как линейная поляризация при передаче и приеме, результатом чего становятся наблюдаемые на радиолокационной развертке фарадеевские вариации. На большинстве радаров в экспериментах по зондированию ионосферы излучается и принимается волна с круговой поляризацией, т. е. вращение плоскости поляризации не влияет на полную мощность сигнала [Шпынев, 2000]. Особенность ИРНР приводит к тому, что восстанавливать профиль электронной концентрации нужно по форме фарадеевских вариаций.

Цель данной работы – исследовать влияние фарадеевского вращения на качество восстановления параметров ионосферы (профиля N_e) для различных типов зондирующих сигналов: определить оптимальные ха-

рактеристики зондирующего сигнала, обеспечивающие наиболее точное восстановление фарадеевских вариаций. Знание наиболее точной формы фарадеевских вариаций необходимо для более точного восстановления профиля электронной концентрации.

В настоящей работе приводятся оптимальные характеристики зондирующего импульса (длительность, число элементов в коде Баркера), которые обеспечивают наиболее точное восстановление исходного профиля фарадеевских вариаций, для различных уровней электронной концентрации и формы спектра мощности НР-сигнала. Данные характеристики получены с помощью радиофизической модели ионосферы [Афифи, Эйзен, 1982], учитывающей основные ее свойства и особенность ИРНР.

Краткое описание входных параметров модели

Математическое представление, полученное для радиофизической модели ионосферы, описывающее поведение отдельной реализации сигнала некогерентного рассеяния, дается выражением [Алсаткин и др., 2007]:

$$\begin{aligned} G(\tau) &= \sum_{i=0}^P \sum_{l=-n}^n \sum_{k=0}^m h(t_k)H(\tau-t_k-t_i) \times \\ &\times b(\tau-t_k-t_i)S(\omega_i)e^{i\omega_{D,i}(\tau-t_k-t_i)}e^{-i\phi_i}, \end{aligned}$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика согласованного фильтра; $H(t)$ – зависимость фарадеевского вращения от времени; $b(t)$ – огибающая излучаемого импульса; $S(\omega)$ – спектральная плотность мощности; ω_D и ϕ – доплеровская частота и фаза отраженного сигнала. Значения как для профиля фарадеевских вариаций $H(t)$, так и для спектральной плотности мощности $S(\omega)$ строились по соответствующим формулам.

Выражение для профиля фарадеевских вариаций:

$$\frac{N_e(r)}{r^2} \cos^2 \left(\frac{e^3 B_r \cos(\alpha)}{\epsilon_0 c (2\pi f_0 m_e)^2} \int_0^r N_e(z) dz \right),$$

где e – заряд электрона, B_r – магнитная индукция, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, f_0 – частота зондирования, m_e – масса электрона, $N_e(r)$ – электронная концентрация, α – угол между геомагнитным полем и направлением излучения, c – скорость света. Примеры фарадеевских вариаций для различных значений $N_e(r)$ приведены на рис. 1 и 2.

Выражение для спектральной плотности мощности:

$$S(\omega) = \frac{N_e(r)}{\omega V \sqrt{\pi}} \frac{\Theta_e e^{-\Theta_e^2} |\alpha_i^2 Z(\Theta_i) + 1|^2 + \Theta_i e^{-\Theta_i^2} |\alpha_e^2 Z(\Theta_e)|^2}{|1 + \alpha_i^2 Z(\Theta_i) + \alpha_e^2 Z(\Theta_e)|^2},$$

где $N_e(r)$ – электронная концентрация, $\alpha_{e,i} = 4\pi \frac{\lambda}{D_{e,i}}$ – отношение длины волны зондирующего сигнала к радиусу Дебая, V – рассеивающий объем, \vec{k} – волновой вектор, $Z(\Theta) = 1 - \Theta e^{-\Theta^2} \left(2 \int_0^\Theta e^{p^2} dp + i\sqrt{\pi} \right)$ – инте-

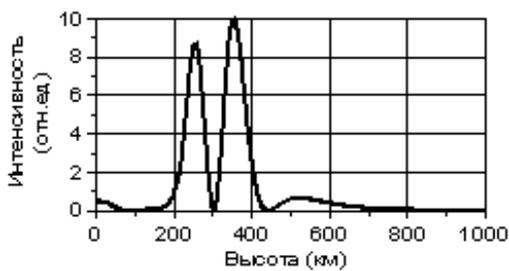


Рис. 1. Фарадеевские вариации $N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (в максимуме слоя F2).

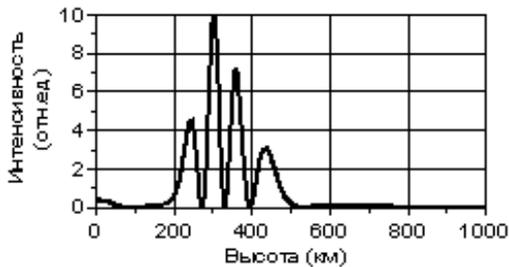


Рис. 2. Фарадеевские вариации $N_e=9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (в максимуме слоя F2).

грал Ландау, $\Theta_{e,i} = \frac{\omega}{k} \left[\frac{m_{e,i}}{2KT_{e,i}} \right]^{1/2}$ – частота, норми-

рованная на среднюю скорость движения частицы и волновой вектор зондирующего сигнала. Спектры мощности приведены на рис. 3 и 4. Вид огибающей излучаемого сигнала представлен на рис. 5.

Для оценки качества восстановления профиля фарадеевских вариаций вычисляется коэффициент корреляции [Афифи, Эйзен, 1982]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Коэффициент корреляции является нормированным, и его значения лежат в пределах от нуля до единицы.

В модели применяются различные виды зондирующих сигналов – от простого гладкого импульса до фазоманипулированных сигналов (кодов Баркера), в которых переменными параметрами являются как общая длительность, так и длительность одного дискрета. Строятся отклики модели на исследуемые сигналы. Между откликами модели и заданным профилем вычисляются коэффициенты корреляции. Затем для каждого кода Баркера строится зависимость коэффициента корреляции от общей длительности применяемого сигнала.

Результаты моделирования

Задача моделирования заключалась в оценке влияния параметров ионосферы и излучаемого сигнала на качество восстановления профиля фарадеевских вариаций. Основными параметрами ионосферы являются форма фарадеевских вариаций и спектр мощности; параметрами сигнала являются общая длительность и число элементов кода Баркера. В данной работе при

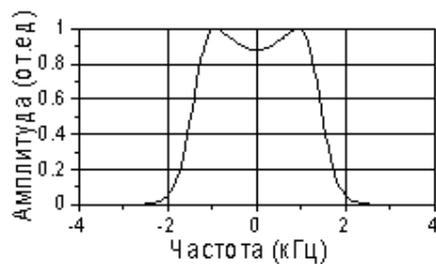


Рис. 3. Спектр мощности $T_i=800$ и $T_e=800$.

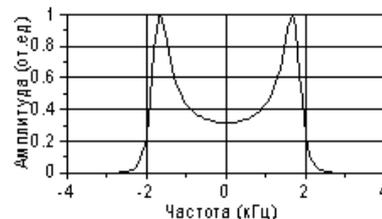


Рис. 4. Спектр мощности $T_i=800$ и $T_e=2500$.

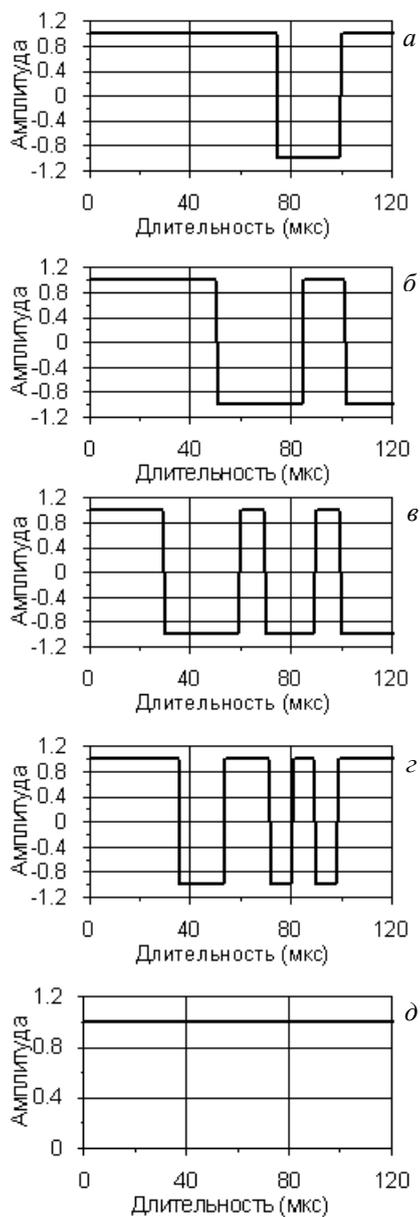


Рис. 5. Огибающая излучаемого сигнала: а – 5-элементный код; б – 7-элементный код; в – 11-элементный код; z – 13-элементный код; д – прямоугольный импульс.

моделировании производилось варьирование всех перечисленных параметров, а также отношения сигнал/шум. Форма фарадеевских вариаций вычислялась для трех значений электронной концентрации: минимального, среднего и высокого. Спектр мощности варьировал в зависимости от соотношения T_e/T_i .

Для каждого варьируемого параметра в отдельности строились отклики модели на различные формы зондирующих сигналов и производилось сравнение с заданным профилем. Вычисление отклика осуществлялось по следующему алгоритму: для прямоугольного импульса производилось усреднение по тысяче реализаций, предварительно возведенных в квадрат; для сложных сигналов перед усреднением (также по тысяче реализаций, возведенных в квадрат) производилась согласованная обработка каждой реализации.

На рис. 6 представлены результаты, полученные в ходе моделирования с различными значениями общей длительности импульса, числа элементов в коде Баркера, электронной концентрации в максимуме слоя F2 и при различном уровне шума. Жирной линией изображен профиль мощности, полученный с использованием фазоманипулированного сигнала, штриховой – профиль мощности, получен-

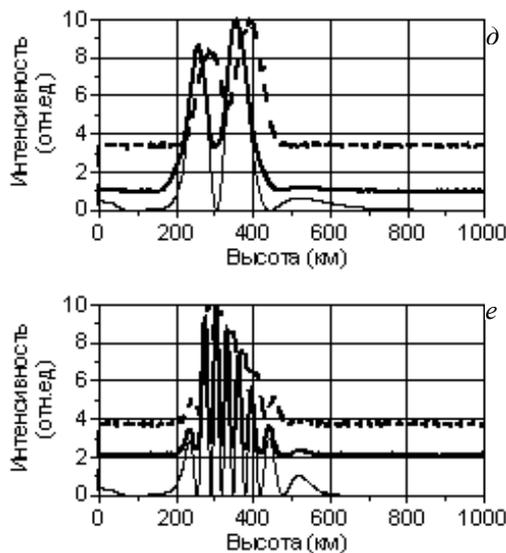
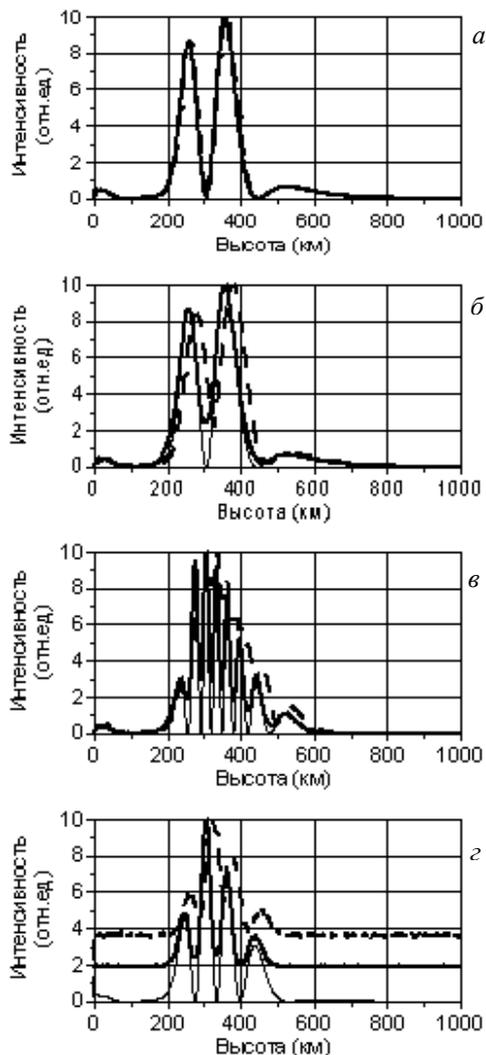


Рис. 6. Профили фарадеевских вариаций: толстая линия – профиль мощности, полученный с использованием фазоманипулированного сигнала, штриховая линия – профиль мощности, полученный гладким прямоугольным импульсом, тонкая линия – исходный профиль мощности; n – число элементов в коде Баркера для фазоманипулированного сигнала; $t_{имп}$ – общая длительность импульса (как прямоугольного, так и фазоманипулированного), N_e – значение электронной концентрации в максимуме слоя F2: $n=11, t_{имп}=44, N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (а); $n=5, t_{имп}=180, N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (б); $n=7, t_{имп}=140, N_e=17 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (в); $n=13, t_{имп}=156, N_e=9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (г); $n=5, t_{имп}=260, N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (д); $n=13, t_{имп}=104, N_e=17 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (е).

ный гладким прямоугольным импульсом, а тонкой линией – исходный профиль мощности.

Результаты сравнения полученных откликов с исходным профилем мощности, позволяющие судить о качестве восстановления профиля фарадеевских вариаций, представлены на рис. 7 и 8.

На рис. 7 представлены результаты сравнения полученных откликов для неизменного значения N_e в максимуме слоя F2, но различных значений отношения сигнал/шум и T_e/T_i . Анализ графиков показывает, что выбор оптимальных параметров зондирующего сигнала не зависит либо очень слабо зависит от соотношения T_e/T_i .

На рис. 8 представлены результаты сравнения полученных откликов при постоянном значении соотношения T_e/T_i , различных значениях N_e и соотношения сигнал/шум. В отсутствие шума наиболее оптимальным является 13-элементный код, наихудшим – 5-элементный код. Причем позиции 13-элементного кода усиливаются как с увеличением общей длительности зондирующего сигнала, так и с увеличением N_e .

При добавлении шума картина меняется: до определенной длительности излучаемого импульса оптимальным является 5-элементный код, наихудшим – 13-элементный код. После превышения этой длительности излучаемого импульса наилучшим вновь становится 13-элементный код, наихудшим – 5-элементный код. С увеличением N_e влияние длительности излучаемого сигнала стано-

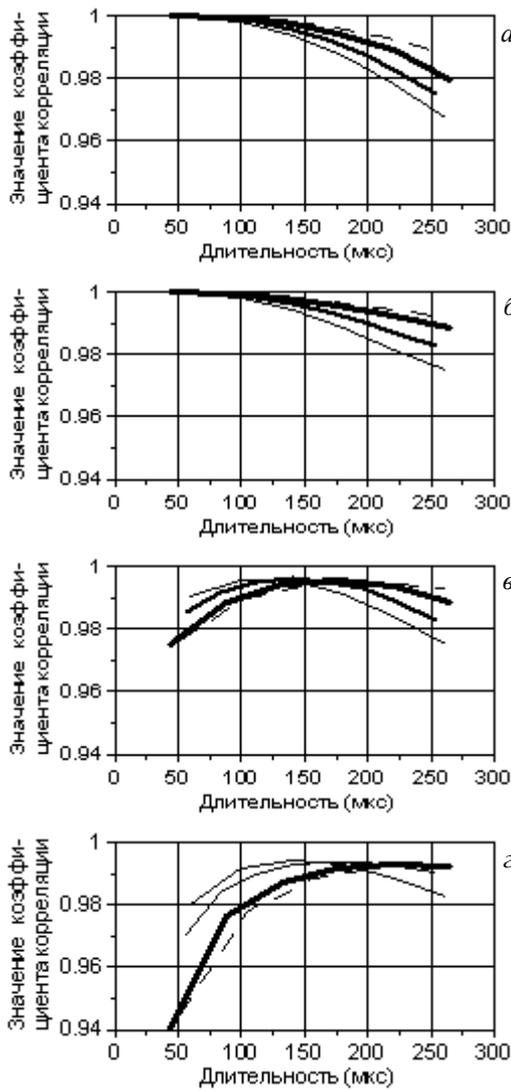


Рис. 7. Коэффициент корреляции между исходным и восстановленным профилями мощности: тонкая линия – 5-элементный код Баркера, линия средней толщины – 7-элементный код Баркера, толстая линия – 11-элементный код Баркера; штриховая линия – 13-элементный код Баркера: $N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_i=800$, $T_e=2500$, $n/s=0$ (а); $N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_i=800$, $T_e=800$, $n/s=0$ (б); $N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_i=800$, $T_e=800$, $n/s=1$ (в); $N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_i=800$, $T_e=800$, $n/s=1$ (г).

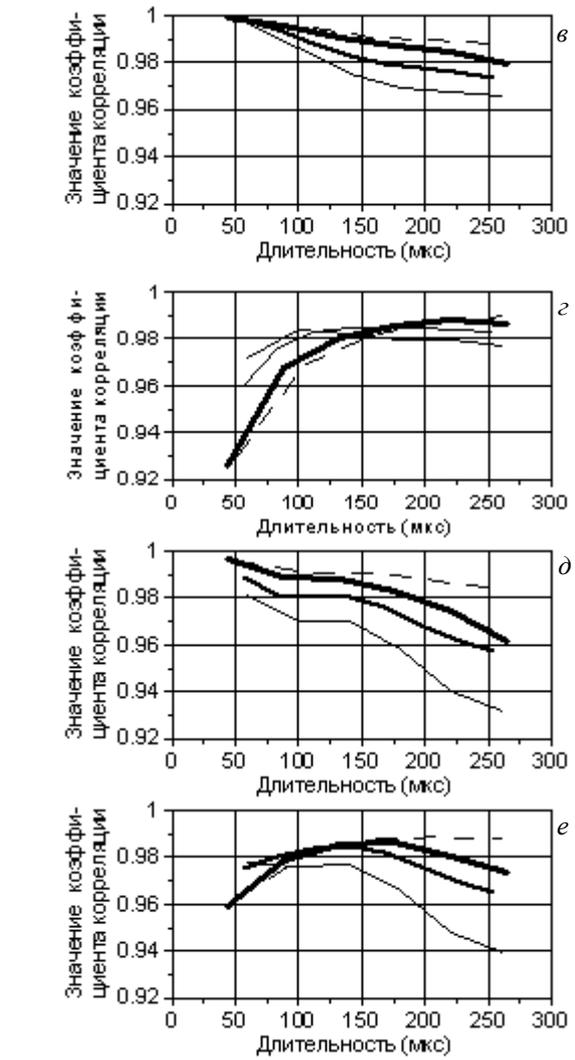
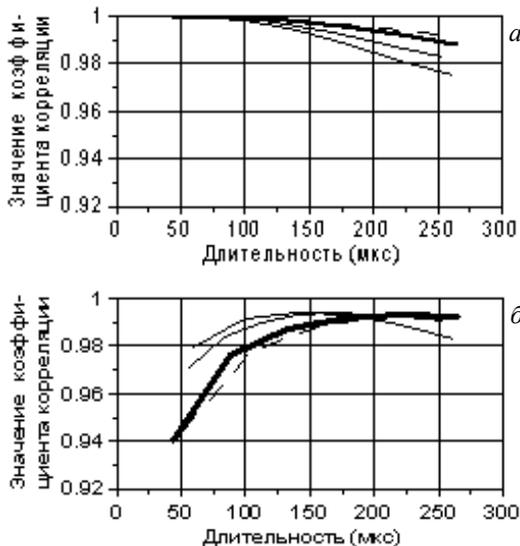


Рис. 8. Коэффициент корреляции между исходным и восстановленным профилями мощности: тонкая линия – 5-элементный код Баркера, линия средней толщины – 7-элементный код Баркера, толстая линия – 11-элементный код Баркера, штриховая линия – 13-элементный код Баркера; $N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n/s=0$ (а); $N_e=4.3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n/s=1$ (б); $N_e=9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n/s=0$ (в); $N_e=9 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n/s=1$ (г); $N_e=17 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n/s=0$ (д); $N_e=17 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, $n/s=1$ (е).

вится меньше. На основании выполненных сравнений полученных откликов видно, что 13-элементный код является предпочтительным, так как он способен обеспечивать наибольшую энергетичность и наилучшее разрешение по высоте при любых значениях N_e .

Выводы

Анализ данных, полученных в результате моделирования, позволяет сделать следующие выводы:

1. Выбор оптимальных параметров зондирующего сигнала не зависит либо слабо зависит от соотношения T_e/T_i .
2. Наиболее оптимальным является 13-элементный код Баркера, так как при нем обеспечиваются наилучшие разрешение по высоте, отношение сигнал/шум и восстановление профиля фарадеевских вариаций. Полученный результат согласуется с результатами, полученными в статье [Шпынев, 2000].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 10-05-01099-а и № 11-05-00698-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алсаткин С.С., Медведев А.В., Кушнарев Д.С. Исследование возможности применения сложных сигналов в методе НР путем математического моделирования // Труды XI Конференции молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования». Иркутск, 2007. С. 72–76.

Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 488 с.

Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Советское радио, 1971. 672 с.

Кобзарева Ю.Б. Современная радиолокация (анализ, расчет и проектирование систем). М.: Советское радио, 1969. 704 с.

Свистов В.М. Радиолокационные сигналы и их обработка. М.: Советское радио, 1977. 448 с.

Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.

Шпынев Б.Г. Методы обработки сигналов некогерентного рассеяния с учетом эффекта Фарадея: Дисс. ... к.ф.-м.н. / Иркутский госуниверситет. Иркутск, 2000.

Gray R.W., Farley D.T. Theory of incoherent-scatter measurements using compressed pulses // Radio Sci. 1973. V. 8, N 2. P. 123–131.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск