

Определение параметра рассеяния на ионосферном экране при распространении радиосигнала в канале Земля-ионосфера в коротком диапазоне радиоволн

Белов С. Ю.¹, Белова И. Н.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
г. Москва, Россия

email: Belov_Sergej@Mail.Ru Belova_Ija@Mail.Ru

Введение

В работе предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум β_K ионосферного сигнала. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения параметра β_K новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный и одного порядка с известной когерентной методикой.

Параметр β_K возвращённого, частично рассеянного ионосферного сигнала представляет интерес как важная характеристика “возмущённости”, “мутности” статистически неоднородной ионосферной плазмы, показатель надёжности работы ионосферных каналов связи, а также диагностических каналов. Оперативная и надёжная оценка параметра β_K имеет общефизический интерес (радиофизика, геофизика, оптика и т. д.); конкретизация осуществлена для ионосферного случая. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли на предмет предвестников землетрясений, поскольку параметр рассеяния формируется также и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур.

Проблема измерения и учёта рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн важна для решения ряда задач, например, при диагностике свойств среды с помощью методов, использующих этот радиодиапазон, когда на трассе происходит промежуточное отражение (рассеяние) от земной поверхности, что представляет интерес для геологоразведочных и экологических исследований.

Важнейшими аспектами при использовании средств космического базирования для целей природопользования и экологического мониторинга являются выбор рабочего диапазона зондирования и вопросы влияния сред на проходящее излучение. Выбор КВ диапазона позволяет учитывать подповерхностный слой (толщины порядка длины волны падающего излучения).

Методы расчёта (когерентный и некогерентный)

В фиксированной точке приёма на поверхности земли (в скалярном приближении) ионосферный сигнал, узкополосный случайный процесс $E(t)$ представляет собой суперпозицию “зеркальной” $E_0(t)$ и рассеянной $E_P(t)$ по нормальному закону компонент:

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0(t) + E_P(t) = E_{00} \cdot e^{i(\omega_0 t - \varphi(t))} + E_P(t) = \\ &= R(t) \cdot e^{i(\omega_0 t - \Phi(t))} = [E_C(t) + i \cdot E_S(t)] \cdot e^{i\omega_0 t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varphi(t)$, $\Phi(t)$, $R(t)$, $E_m(t)$, $m=c,s$ – медленные на периоде $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ случайные процессы; $E_{00} = \text{Const}$.

Параметр рассеяния определяется отношением:

$$\beta_k^2 = \frac{\text{мощность зеркальной компоненты}}{\text{мощность рассеянной компоненты}} = \frac{E_{00}^2}{2 \cdot E_P^2}. \quad (2)$$

Здесь и ниже черта “ — ” означает статистическое усреднение. $E_C(t) = R(t) \cdot \cos \Phi(t)$ и $E_S(t) = R(t) \cdot \sin \Phi(t)$ – низкочастотные квадратуры ионосферного сигнала, $R(t)$ – огибающая, $\Phi(t)$ – суммарная фаза.

При этом индекс $K = E4, R2, R4$ означает экспериментально регистрируемые первичные случайные процессы и соответствующий метод их регистрации: $E4$ – когерентный; $R2, R4$ – некогерентные амплитудные.

Достаточно широко используется для оценки β_K (2) стандартный некогерентный $R2$ -метод, основанный на соотношении [1]:

$$\frac{\overline{R^2}}{(\overline{R})^2} = f(\beta_{R2}) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \beta_{R2}^2) \cdot \exp(\beta_{R2}^2)}{[(1 + \beta_{R2}^2) \cdot I_0(\beta_{R2}^2/2) + \beta_{R2}^2 \cdot I_1(\beta_{R2}^2/2)]^2}. \quad (3)$$

$I_n(x)$ – функция Бесселя n -порядка от чисто мнимого аргумента.

Используя когерентный $E4$ метод, β_{E4} оценивается по эксцессу γ_{E4} квадратур [2, 3]:

$$\gamma_{E4}(\beta_{E4}) = \frac{\overline{E_m^4}}{(\overline{E_m^2})^2} - 3 = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\beta_{E4}^4}{(1 + \beta_{E4}^2)^2}; \text{?m=c,s.} \quad (4)$$

Следует заметить, что измеряемыми первичными параметрами являются отношения моментов $\overline{R^2}/(\overline{R})^2$, $\overline{E_m^4}/(\overline{E_m^2})^2$ соответственно. Естественно, соотношения (3), (4) получены с учётом определённых моделей структуры ионосферного сигнала. Исследования показали, что вероятностные свойства ионосферного сигнала (1) отражений первой кратности достаточно хорошо описываются моделью Райса со смещённым спектром (РС-модель) [4–6], на основе которой получены выражения (3), (4). Заметим, что выражение (4) когерентной методики $E4$ обеспечивает на порядок более высокую относительную аналитическую точность оценки параметра β_K [7, 8].

В настоящей работе предлагается новый некогерентный $R4$ метод определения β_{R4} по эксцессу γ_{R4} огибающей для РС модели [2]:

$$\gamma_{R4}(\beta_{R4}) = \frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2} - 3 = \gamma_{R4}(\beta_{R4}) = -1 - \frac{\beta_{R4}^4}{(1 + \beta_{R4}^2)^2}. \quad (4)$$

Для сопоставления приведённых методов в смысле относительных погрешностей, допускаемых при вычислении β_K , обусловленных видом функциональных зависимостей $f(\beta)$, $\gamma_{E4}(\beta)$ и $\gamma_{R4}(\beta)$, получим выражения (5):

$$\varepsilon_k = \left| \frac{\Delta \beta_K}{\beta_K} \right| = \left| \frac{1}{\beta_K} \cdot \frac{dG_K}{dZ_K} \cdot \Delta(Z_K) \right|, \quad (5)$$

где $K = R2, E4, R4$; $G_K = f, \gamma_{E4}, \gamma_{R4}$; $\Delta(Z_K)$ – абсолютные статистические ошибки измеряемых величин: $Z_K = \frac{\overline{R^2}}{(\overline{R})^2}$, $\frac{\overline{E_m^4}}{(\overline{E_m^2})^2}$, $\frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2}$.

Погрешности (включая статистические) для разных методик определения β_K :

$$\varepsilon_{R2}(\beta) = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{[(1 + \beta^2) \cdot I_0(\beta^2/2) + \beta^2 \cdot I_1(\beta^2/2)]^3}{\beta^2 \cdot \exp(\beta^2) \cdot I_1(\beta^2/2)} \cdot \Delta(Z_{R2}); \quad (6)$$

$$\varepsilon_{E4}(\beta) = \frac{(1 + \beta^2)^3}{6 \cdot \beta^4} \cdot \Delta(Z_{E4}); \quad (7)$$

$$\varepsilon_{R4}(\beta) = \frac{(1 + \beta^2)^3}{4 \cdot \beta^4} \cdot \Delta(Z_{R4}). \quad (8)$$

Статистическая ошибка $\Delta(Z_K)$ зависит от объёма выборки N и при одинаковых объёмах выборки может быть разной для каждого из способов. Чтобы акцентировать внимание

на погрешностях за счёт различия функциональных зависимостей (3) – (4), нормируем (7) на $\Delta(Z_K)$.

Графики зависимостей $\varepsilon_K^* = \frac{\varepsilon_K}{\Delta(Z_K)}$ для β_{R2} , β_{E4} и β_{R4} приведены на рис. 1. ε_K^* будем ниже называть аналитической (относительной) погрешностью метода.

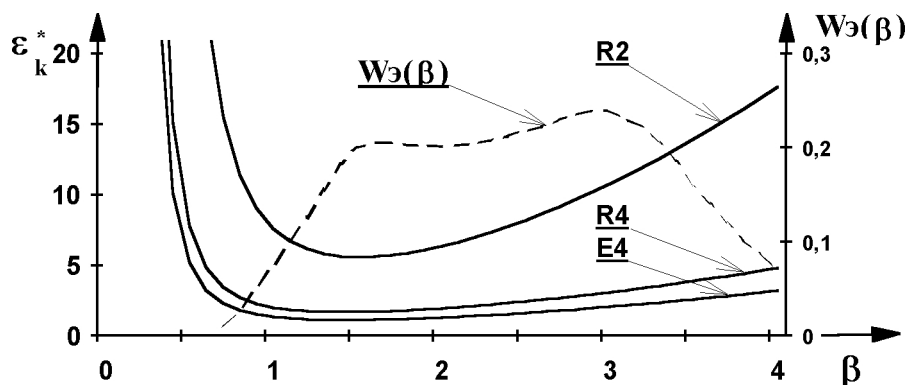


Рис. 1. Графики зависимостей ε_K^* , $K = R2, R4, E4$ (сплошные линии) и экспериментальное распределение $W_{\mathcal{E}}(\beta)$ (пунктир) (слой F2, 4,5 – 9,5 МГц, единичный сигнал)

Экспериментальное распределение $W_{\mathcal{E}}(\beta)$ определяет диапазон изменения β .

Заключение

Из выражений (4) и (4) видно, что $\varepsilon_{E4}^* = \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_{R4}^*$ – одного порядка и существенно (на порядок) превосходят точность измерения стандартной R2методики [9, 10]. В итоге, анализ аналитических погрешностей оценки параметра β_K позволил рекомендовать метод R4 вместо стандартного R2. При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки параметра β_K может быть достигнута с помощью некогерентной аппаратуры, используя выражение (4) метода R4 [11]. Естественно, что за когерентной методикой E4 остается возможность оптимизации статистической ошибки путём соответствующей специальной цифровой обработки ионосферного сигнала [12].

Литература

1. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн в ионосфере. АН СССР, М, 1960. 480 с.
2. Белов С.Ю. Методы оценки параметра сигнал/шум в коротковолновом диапазоне радиоволн. // Физические проблемы экологии (Экологическая физика) №16. Сборник научных трудов под ред. В. И. Трухина, Ю. А. Пирогова, К. В. Показеева. М.: МАКС Пресс. 2010. С. 3138.
3. Белов С.Ю. Численное моделирование в задаче тестирования метода дистанционной диагностики рассеивающей способности земной поверхности в КВ-радиодиапазоне. // Материалы Международного молодежного научного форума “Ломоносов-2015”. / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2015 г.
4. Белов С.Ю. О методах определения параметра сигнал/шум на примере распространения радиосигнала в канале Земля – Ионосфера. // Материалы Международного молодежного научного форума “Ломоносов-2013”. / Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, М.В. Чистякова. [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2013 г. С. 73.

5. Белов С.Ю., Белова И.Н. Выявление экологического риска при мониторинге поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн. // Сборник трудов II Всероссийской научной конференции “Экология и космос” имени академика К. Я. Кондратьева. / Под общ. ред. Ю. В. Кулешова. – 461 с, СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015 г. С. 70-76.
6. Белов С.Ю., Белова И.Н. О параметре “возмущённости” неоднородного флуктуирующего дифракционного экрана. // Международный Симпозиум "Атмосферная Радиация и Динамика"(МСАРД–2015), Санкт–Петербург, 2015. С. 103.
7. Белов С.Ю. Дистанционная диагностика рассеивающей способности земной поверхности в КВ-диапазоне. // Перспективы развития научных исследований в 21 веке: сборник материалов 6-й международной научно-практической конференции. – г. Махачкала: ООО "Апробация 2014. С. 43.
8. Belov S.Yu. New measurement method of estimation signal/noise parameter. // European Geosciences Union General Assembly 2010 Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts. 2010. V. 12. P. 2233.
9. Белов С.Ю., Белова И.Н. Функциональная схема экспериментальной аппаратуры когерентного приёма в задачах мониторинга поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн. // III Международная научно-практическая конференция “Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий”. Материалы III Международной научно-практической конференции. – Майкоп, 2015г. – 262 с. ISBN 978-5-906696-22-9. С. 5358.
10. Белов С.Ю., Белова И.Н. Мониторинг поверхности земли методом дистанционного зондирования в КВ-радиодиапазоне. // V Международная молодёжная научная конференция “Экология-2015”: материалы докл. Всероссийской конференции с международным участием, 22–24 сентября 2015 г. ISBN 978-5-91378-098-0. Архангельск, 2015. С. 6–7.
11. Belov S.Yu., Belova I.N. Environmental aspects of the use of remote sensing of the earth’s surface in the short-wave range of radio waves. // IGCP 610 Third Plenary Conference and Field Trip “From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary” 22-30 September 2015, Astrakhan, Russia. Proceedings / Ed.: A. Gilbert, V. Yanko-Hombach, T. Yanina. Moscow, MSU, 2015. P. 29–31.
12. Белов С.Ю. Программа регистрации квадратурных компонент n-кратного отражённого от земной поверхности радиосигнала. Свидетельство о регистрации права на программное обеспечение № RU.2016612172 от 19.02.2016 г.