

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ РЕШЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН**

С.Ю. Белов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Belov_Sergej@Mail.Ru

**COMPARATIVE ANALYSIS OF WAYS TO SOLVE COMPUTATIONAL PROBLEMS
OF DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF THE SCATTERING ABILITY OF THE EARTH'S
SURFACE IN THE HIGH-FREQUENCY RANGE OF RADIO WAVES**

S.Yu. Belov

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. В работе рассматривается задача дистанционной диагностики «шероховатой» земной поверхности и диэлектрических подповерхностных структур в КВ-диапазоне. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли, поскольку параметр рассеяния формируется и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур. Идея метода определения этого параметра заключается в том, что, располагая синхронной информацией о волне, отраженной от ионосферы и о волне, отраженной от земли и ионосферы (или прошедшей ионосферу дважды при зондировании со спутника), возможно извлекать информацию о параметре рассеяния. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный. Анализ аналитических погрешностей оценки этого параметра позволил рекомендовать новый метод вместо стандартного.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, КВ-диапазон, параметр рассеяния сигнал/шум, ионосфера.

Abstract. The problem of remote diagnostics of the "rough" earth surface and dielectric subsurface structures the short-wave band is considered. A new incoherent method for estimating the signal/noise ratio parameter is proposed. This band range allows one to diagnose subsurface aspects of the earth, as the scattering parameter is affected by irregularities in the dielectric permittivity of subsurface structures. The idea of the method for determining this parameter is that, by having synchronous information about a wave reflected from the ionosphere and about a wave reflected from the earth and the ionosphere (or passed through the ionosphere twice when probing from a satellite), it is possible to extract information about the scattering parameter. A comparative analysis and shows that the analytical (relative) accuracy of the determination of this parameter new method on the order exceeds the widely-used standard method. Analysis of admissible relative analytical error of estimation of this parameter allowed to recommend new method instead of standard method.

Keywords: remote sensing, SW range, the scattering parameter signal-to-noise ratio, ionosphere.

Введение

Параметр β_K возвращенного, частично рассеянного ионосферного сигнала представляет интерес как важная характеристика «возмущенности», «мутности» статистически неоднородной ионосферной плазмы, показатель надежности работы ионосферных каналов связи, а также диагностических каналов. Оперативная и надежная 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, поскольку параметр рассеяния формируется также и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур.

Проблема измерения и учета рассеивающей способности земной поверхности в коротковолно-

вом 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 [Космический мониторинг..., 2016].

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 [Дистанционные методы..., 2016]. Выбор КВ диапазона позволяет учитывать подповерхностный слой (толщины порядка длины волны падающего излучения) [Methods of obtaining data..., 2016].

Методы расчета (когерентный и некогерентный)

В фиксированной точке приема 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:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_0(t) + \varepsilon_p(t) = E_{00} e^{i(\omega_0 t - \Phi(t))} + \varepsilon_p(t) = \\ &= R(t) e^{i(\omega_0 t - \Phi(t))} = [E_c(t) + iE_s(t)] e^{i\omega_0 t}, \end{aligned} \quad (1)$$

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

Параметр рассеяния определяется отношением:

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

Здесь и ниже черта “—” означает статистическое усреднение. $E_c(t) = R(t) \cos \Phi(t)$ и $E_s(t) = R(t) \sin \Phi(t)$ — 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 [Альперт, 1960]:

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

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

Используя когерентный $E4$ — метод, β_{E4} оценивается по эксцессу γ_{E4} квадратур:

$$\begin{aligned} \gamma_{E4}(\beta_{E4}) &= \frac{\overline{E_m^4}}{(\overline{E_m^2})^2} - 3 = \frac{3}{2} \frac{\beta_{E4}^4}{(1 + \beta_{E4}^2)^2}; \\ m &= c, s. \end{aligned} \quad (4)$$

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 учетом определенных моделей структуры ионосферного сигнала [The analysis of monitoring data..., 2016]. Исследования показали, что вероятностные свойства ионосферного сигнала (1) [The analysis of methods..., 2016] отражений первой кратности достаточно хорошо описываются моделью Райса со смещенным спектром (РС-модель), на основе которой получены выражения (3), (4) [Экспериментальное исследование..., 2016]. Заметим, что выражение (4) когерентной методики $E4$ обеспечивает на порядок более высокую относительную аналитическую точность оценки параметра β_k [Математические методы..., 2016].

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

$$\gamma_{R4}(\beta_{R4}) = \frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2} - 3 = \gamma_{R4}(\beta_{R4}) = -1 - \frac{\beta_{R4}^4}{(1 + \beta_{R4}^2)^2}. \quad (5)$$

Для сопоставления приведенных 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 (6):

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &= \left| \frac{\Delta \beta_k}{\beta_k} \right| = \left| \frac{1}{\beta_k} \frac{dG_K}{dZ_K} \Delta(Z_K) \right|, \\ Z_K &= \frac{\overline{R^2}}{(\overline{R})^2}, \frac{\overline{E_m^4}}{(\overline{E_m^2})^2}, \frac{\overline{R^4}}{(\overline{R^2})^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $G_K=f, \gamma_{E4}, \gamma_{R4}$; $\Delta(Z_K)$ — абсолютные статистические ошибки измеряемых величин.

Погрешности (включая статистические) для разных методик определения β_k [О способах определения..., 2016]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{R2}(\beta) &= \frac{\pi}{8} \frac{[(1 + \beta^2) \cdot I_0(\beta^2/2) + \beta^2 \cdot I_1(\beta^2/2)]^3}{\beta^2 \cdot \exp(\beta^2) \cdot I_1(\beta^2/2)} \Delta(Z_{R2}); \\ \varepsilon_{E4}(\beta) &= \frac{(1 + \beta^2)^3}{6 \cdot \beta^4} \Delta(Z_{E4}); \\ \varepsilon_{R4}(\beta) &= \frac{(1 + \beta^2)^3}{4 \cdot \beta^4} \Delta(Z_{R4}). \end{aligned} \quad (7)$$

Статистическая ошибка $\Delta(Z_K)$ зависит от объема выборки N и при одинаковых объемах выборки может быть разной для каждого из способов. Чтобы акцентировать внимание на погрешностях за счет различия функциональных зависимостей (3)–(5), 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.

Экспериментальное распределение $W_{\Sigma}(\beta)$ определяет диапазон изменения β . [Monitoring of coastal..., 2016].

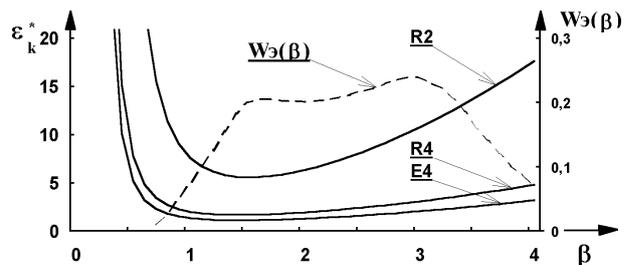


Рис. 1. Графики зависимостей ε_k^* , $K=R2, R4, E4$ (сплошные линии) и экспериментальное распределение $W_{\Sigma}(\beta)$ (пунктир) (слой F2, 4.5–9.5 МГц)

Заключение

Из выражений (4) и (5) видно, что $\varepsilon_{E4}^* = \frac{2}{3} \varepsilon_{R4}^*$ — одного порядка и существенно (на порядок) превосходят точность измерения стандартной R2-методики. 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 (5) метода R4. Отметим, что за когерентной методикой E4 остается возможность оптимизации статистической ошибки путем соответствующей специальной цифровой обработки ионосферного сигнала [Программа..., 2016].

Список литературы

Альперт Я.Л. Распространение радиоволн в ионосфере. М.: АН СССР, 1960.

Белов С.Ю. Экспериментальное исследование характеристик когерентной и некогерентной обработки информации при дистанционном зондировании атмосферы и «шероховатой» земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12-3. С. 121–124.

Белов С.Ю. Программа регистрации квадратурных компонент n-кратного отраженного от земной поверхности радиосигнала. Свидетельство о регистрации права на программное обеспечение № RU.2016612172 от 19.02.2016 г.

Белов С.Ю. О способах определения параметра сигнал/шум при отражении радиоволн от границы раздела двух сред в КВ-диапазоне // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография. Севастополь. 2016. С. 528–533.

Белов С.Ю. Дистанционные методы наблюдений и технологии мониторинга природно-техногенных опасных процессов в коротковолновом диапазоне радиоволн. // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016. С. 172–175.

Белов С.Ю., Белова И.Н. Математические методы определения характеристик рассеивающей способности отражающего экрана когерентным и некогерентным способами // Математика, физика, информатика и их приложения в науке и образовании. М.: МГУ, 2016. С. 155–157.

Белов С.Ю. Космический мониторинг характеристик прибрежных территорий для обеспечения экологической безопасности зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. С. 27–41.

Belov S.Yu. The analysis of monitoring data of the parameter scattering power the earth's surface in the short-wave range of radio waves // Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies, Geoinformatics research papers. 2016. V. 4, N 2. P. 50. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi.

Belov S.Yu., Belova I.N. The analysis of methods of determination the scattering parameter of the inhomogeneous fluctuating ionospheric screen. Atmosphere, Ionosphere, Safety. Kaliningrad, 2016. P. 435–440.

Belov S.Yu., Belova I.N. Methods of obtaining data on the characteristics of superficial and subsurface structures of the earth by remote sensing in the short-wave range of radio waves // IGCP 610 project “From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary” (2013–2017), GNAS Tbilisi, Georgia. 2016. P. 26–29.

Belov S.Yu., Belova I.N., Falomeev S.D. Monitoring of coastal ecosystems by method of remote sensing in the short-wave range of radio waves // Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. St. Petersburg. 2016. DOI: 10.21610/conferencearticle_58b4316d2a67c.