

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 500.388.2

А. П. КРИВОНОС, А. В. ШВЕЦ

PACS numbers: 94.20.wc,
94.20.deИнститут радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, Харьков, 61085, Украина
E-mail: lesha5300@yandex.ua

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ТВИК-АТМОСФЕРИКОВ

Предмет и цель работы: Проведен сравнительный анализ фазового и частотного методов определения эффективных высот волновода Земля–ионосфера для основного и высших типов нормальных волн (мод) и дальности до источника излучения – молнии – на основе анализа импульсных сигналов в диапазоне сверхнизких и очень низких частот – твик-атмосфериков (твиков).

Методы и методология: В численном эксперименте с целью тестирования методов волновые формы твиков синтезированы в модели волновода Земля–ионосфера с экспоненциальным профилем проводимости нижней ионосферы. Вычисления проводились при отношении сигнал/шум $20 \div 40$ дБ.

Результаты: Погрешность частотного метода определения эффективной высоты волновода для различных волноводных мод составила менее 0.5 %. Погрешность фазового метода определения эффективной высоты волновода составила менее 0.8 %. Погрешности определения дальности до молнии составили менее 1 % для фазового метода и менее 5 % для частотного метода в диапазоне дальностей $1000 \div 3000$ км.

Заключение: Результаты проведенного анализа показали, что точности частотного и фазового методов практически совпадают в диапазоне дальностей $1000 \div 3000$ км. Для дальностей менее 1000 км фазовый метод показывает более точные оценки дальности, поэтому комбинация двух методов может быть использована для улучшения оценок параметров трассы распространения твиков.

Ключевые слова: локация молний, диагностика нижней ионосферы, СНЧ–ОНЧ радиоволны, твик-атмосферики

1. Введение

Для исследований ионосферы на высотах $60 \div 100$ км с низкой концентрацией электронов $1 \div 1000$ см⁻³ используется радиопросвечивание полости Земля–ионосфера электромагнитными волнами в диапазонах сверхнизких (СНЧ), $3 \div 3000$ Гц, и очень низких частот (ОНЧ), $3 \div 30$ кГц. Источниками зондирующего излучения служат как ОНЧ радиопередатчики навигационных и связных систем, так и разряды молний. Нижняя ионосфера является эффективным отражателем для радиоволн данных диапазонов [1], а их длины волн сравнимы с высотой нижней границы ионосферы, поэтому полость Земля–ионосфера рассматривается как естественный волновод, распространение в котором определяется в основном свойствами ионосферной границы.

Интерес представляют такие параметры ионосферы, как высота нижней границы, профиль плотности плазмы и их динамика, связанная с воздействием различных регулярных и катастрофических явлений атмосферного, космического и земного происхождения.

При изменениях высоты волновода, крутизны нарастания профиля электронной концентрации, при появлении неоднородностей в нижней ионосфере в окрестности трассы распространения изменяются амплитуда и фаза сигналов узкополосных ОНЧ-радиостанций. В диапазоне ОНЧ на трассах длиной менее 3000 км за счет уменьшения затухания в ионосфере в ночное время, кроме основной нормальной волны (моды), значительный вклад в поле вносят волны высших типов. Это обстоятельство существенно затрудняет решение обратной задачи определения параметров волновода по результатам измерений узкополосных излучений ОНЧ-радиостанций. Возможность разделения

разных типов нормальных волн предоставляется при использовании частотно-временного представления естественных импульсных сигналов, которые наблюдаются в ночное время, – твик-атмосфериков (твиков).

Твики представляют собой электромагнитные импульсы длительностью $10 \div 100$ мс с максимумом спектральной плотности в диапазонах СНЧ–ОНЧ и наблюдаются в ночных условиях на трассе распространения. Волновые формы твиков объясняются теорией волноводного распространения электромагнитных волн в полости Земля–ионосфера, возбуждаемой разрядами молний [1]. Твики распространяются на расстояния до нескольких тысяч километров и содержат информацию о свойствах нижней ионосферы вдоль трассы распространения [2–6].

Свое название твики получили благодаря звукоподражанию различимым на слух атмосферным электрическим помехам в линиях телефонной связи [7]. Впервые эти сигналы были детально исследованы в работе [7], в которой по их осциллограммам определялась мгновенная частота сигнала как величина, обратная интервалу времени между двумя соседними пиками осцилляций. Анализ проводился на основе теории многократных отражений импульса, излученного молнией, от земли и ионосферы, первоначально предложенной Баркгаузенем [8] для объяснения формирования “свистящих” атмосфериков. Авторы [7] показали, что в спектре “свистящих” атмосфериков не наблюдается нижняя “предельная” частота, существование которой следует из теории, тогда как в сигналах твиков анализ показал ее наличие.

Анализ магнитофонных записей твиков, сделанных Бартоном и Бордмэном [7], который был выполнен с использованием сонографа, выявил наличие минимум трех хорошо различимых гармоник в сигналах [9].

Разработанные изначально методы анализа твиков оказались недостаточно эффективными [10], что в основном связано с ошибками локации источников атмосфериков [11]. Использование национальных [3] или глобальных [12] сетей локации молний устраняет этот недостаток, однако в настоящее время функционирование национальных сетей ограничено территориями отдельных государств, а информация в обоих случаях

предоставляется на коммерческой основе. Поэтому актуальным является использование однопозиционных методов локации, которые обладают меньшей точностью, но в ряде случаев предоставляют единственную возможность определения координат молний.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ оценки точности двух [10, 13] однопозиционных методов определения параметров волновода Земля–ионосфера по сигналам твиков. Для тестирования методов используются волновые формы, рассчитанные для модели распространения в плоском волноводе с идеально проводящей Землей и ионосферой с экспоненциальным вертикальным профилем проводимости.

2. Фазовый и частотный методы анализа твиков

Традиционно задача восстановления параметров волновода Земля–ионосфера решается путем измерения задержки между волнами с разными частотами в сигнале твика, которая возникает вследствие частотной дисперсии в волноводе [10, 14]. По измеренным задержкам для нескольких частот определяются как дальность до источника, так и высота волновода.

В работе [10] используется метод выделения и анализа основной гармоники твика в частотно-временном представлении сигнала (динамическом спектре), представляющей волноводную моду основного типа. Предложенный в работе [13] однопозиционный метод основан на анализе фазового спектра продольной компоненты магнитного поля (“харьковский метод”). Данная компонента поля в диапазоне между частотами отсечки нормальных волн 1-го и 2-го порядка формируется единственной нормальной волной первого порядка, что используется для совместного определения высоты волновода и дальности до источника.

Поскольку в целом фазовый и амплитудный спектры формируются в результате интерференции нескольких волноводных мод, для определения параметров волновода для мод высшего порядка используется метод, основанный на частотно-временном представлении сигнала [15], поэтому в настоящей работе будут проанализированы также высшие гармоники твиков.

Оба метода основаны на свойстве частотной дисперсии скорости распространения нормальных волн в волноводе Земля–ионосфера. Так, фазовый спектр нормальной волны n -го порядка в сигнале с началом, соответствующим моменту прихода твика в пункт наблюдения, определяется как дальностью до молнии, так и высотой отражения от ионосферы [13]:

$$P_n = k\rho(S_n - 1), \quad (1)$$

где k – волновое число; ρ – расстояние между источником и наблюдателем; $S_n = \sqrt{1 - (f_{cn}/f)^2}$ – синус угла падения нормальной волны, $f_{cn} = nc/(2h)$ – частота отсечки волноводной моды n -го порядка, f – частота волны, h – высота волновода Земля–ионосфера.

Поскольку поле твика формируется несколькими модами, в “харьковском методе” [13] было предложено использовать фазовый спектр продольной магнитной компоненты в полосе частот между первой и второй частотами отсечки, где распространяется только 1-я мода. Данное свойство демонстрируется на рис. 1, где приведен пример экспериментальной записи твика (рис. 1, а), сделанной на борту судна “Акаде-

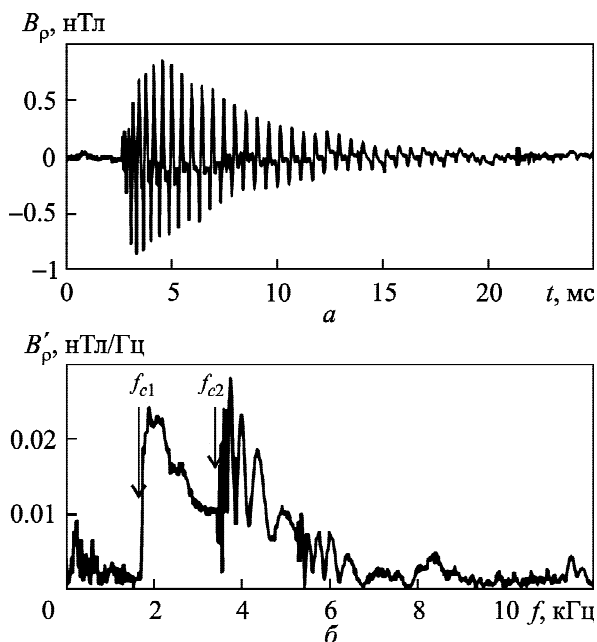


Рис. 1. Волновая форма $B_p(t)$ (а), амплитудный спектр $B'_p(f)$ (б) продольной магнитной компоненты поля твика, зарегистрированного 21 января 1991 г. в 23:30:34 UT в Гвинейском заливе (16.7° ю. ш., 5.5° в. д.)

мик Вернадский” в Гвинейском заливе во время экспедиции Радиоастрономического института НАНУ в 1991 г. [13], и его амплитудный спектр (рис. 1, б). Положения критических частот отмечены на рис. 1, б стрелками.

Алгоритм определения искомых параметров заключается в подгонке теоретического фазового спектра (1) при $n = 1$ к фазовому спектру анализируемого твика в указанном интервале частот. Результат применения данного метода к экспериментальной записи твика показан на рис. 2.

Измеренный фазовый спектр показан кружками, теоретическая кривая (1) с параметрами $h = 89.2$ км и $\rho = 1349$ км, полученными методом наименьших квадратов, – штриховой линией.

Метод частотного анализа основан на разделении и последующем определении частотной дисперсии волноводных мод в сигнале твика из частотно-временного представления сигнала – динамического спектра – путем измерения мгновенных частот гармоник твика.

Зависимость мгновенной частоты сигнала для n -й моды от времени τ , которое отсчитывается от момента прихода твика в пункт наблюдения, в идеальном плоском волноводе определяется следующим образом:

$$f(\tau) = f_{cn} \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho + c\tau} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (2)$$

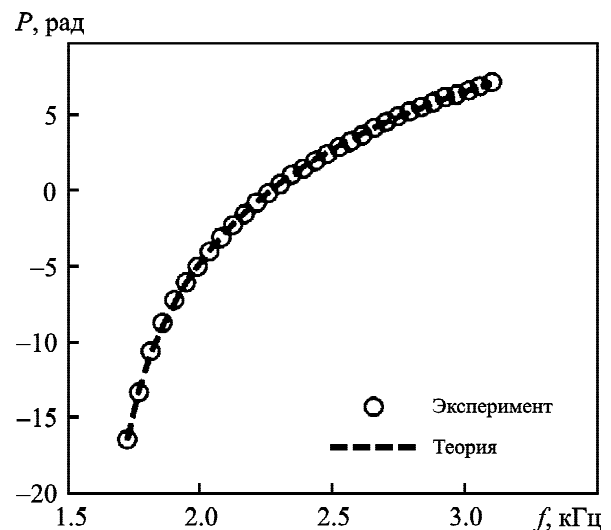


Рис. 2. Фазовый спектр твика, представленного на рис. 1, и теоретический спектр (1) с параметрами $h = 89.2$ км и $\rho = 1349$ км, подобранными методом наименьших квадратов

Алгоритм определения искомых параметров сводится в данном случае к подгонке зависимости (2) к измеренной зависимости от времени мгновенной частоты гармоники твика путем подбора двух параметров: ρ и f_{cn} .

Пример применения данного метода к продольной магнитной компоненте поля твика (рис. 1), в котором отчетливо видны гармоники, соответствующие различным модам, показан на рис. 3. Выделенные гармоники твика, отвечающие максимумам в текущих амплитудных спектрах, показаны на спектрограмме кружками. Высота волновода и дальность до молнии, определенные отдельно для каждой выделенной гармоники, следующие: 1-я мода – $h = 87.93$ км и $\rho = 1272$ км; 2-я мода – $h = 87.66$ км и $\rho = 1245$ км; 3-я мода – $h = 86.92$ км и $\rho = 1126$ км. Соответствующие теоретические зависимости мгновенной частоты (2) показаны на рисунке сплошными линиями.

Из приведенных оценок можно видеть, что дальность и высота уменьшаются одновременно с ростом номера моды. Кроме этого, параметры, определенные выше фазовым методом, также отличаются от последних оценок. Эти различия могут быть обусловлены как систематическими, так и случайными ошибками, прису-

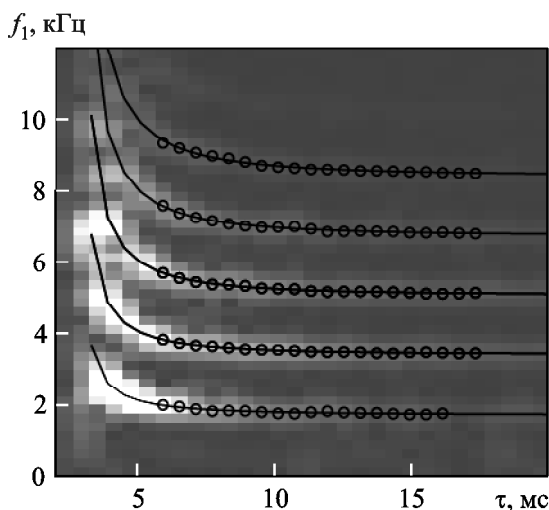


Рис. 3. Динамический спектр продольной магнитной компоненты поля твика, представленного на рис. 1.: кружки – выделенные гармоники; сплошные линии – теоретические зависимости мгновенных частот (2) для 1-й – 3-й мод с параметрами $h = 87.93$ км и $\rho = 1272$ км (1-я мода), $h = 87.66$ км и $\rho = 1245$ км (2-я мода), $h = 86.92$ км и $\rho = 1126$ км (3-я мода)

щими данным методам. Поэтому представляет интерес оценить их точность, в настоящей работе оценка проводится на основе численного моделирования.

3. Модель волновой формы твик-атмосферика

Волновые формы твиков были синтезированы в простейшей модели волновода Земля–ионосфера, которая представляет собой плоский бесконечный волновод. На поверхности Земли спектры вертикальной компоненты электрического и горизонтальной компоненты магнитного полей, возбуждаемых вертикальным электрическим диполем, в цилиндрической системе координат (ρ, ϕ, z) можно записать как сумму нулевой и высших волноводных мод [1]:

$$E_z = \frac{\mu_0 \omega I ds}{2h} \sum_{n=0}^{\infty} \delta_n S_n^2 H_0^{(2)}(k S_n \rho), \quad (3)$$

$$H_\phi = j \frac{\omega I ds}{2hc} \sum_{n=0}^{\infty} \delta_n S_n H_1^{(2)}(k S_n \rho),$$

где μ_0 – магнитная проницаемость свободного пространства; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота; I – ток источника (предполагается равномерным вдоль длины диполя); ds – длина источника; $H_0^{(2)}(\cdot)$, $H_1^{(2)}(\cdot)$ – функции Ханкеля второго рода 0-го и 1-го порядков; $k = \omega/c$ – волновое число в свободном пространстве, c – скорость света; $S_n = \sqrt{1 - C_n^2}$, C_n – направляющий косинус n -й нормальной волны.

Для учета потерь используется модель волновода с экспоненциальным вертикальным профилем проводимости ионосферы [16]:

$$\sigma(z) = 2.5 \cdot 10^5 \varepsilon_0 \exp\left(\frac{z - H}{\zeta_0}\right), \quad (4)$$

где H – характеристическая высота, ζ_0 – локальный высотный масштаб профиля.

Как было показано [17], распространение на СНЧ определяется двумя высотами в экспоненциальном профиле проводимости. Нижней высоте h_0 соответствует высота, на которой ток проводимости, параллельный магнитному полю, ра-

вен току смещения $\sigma(h_0) = \omega \epsilon_0$. Верхняя высота h_1 – это высота, на которой волновое число становится равным обратному локальному высотному масштабу коэффициента преломления: $2\sqrt{\omega\mu_0\sigma(h_1)} = 1/\zeta_0$. Из этих условий можно получить соотношения для высот h_0 и h_1 :

$$h_0 = H - \zeta_0 \ln \frac{2.5 \cdot 10^5}{2\pi f},$$

$$h_1 = h_0 + 2\zeta_0 \ln \frac{2.39 \cdot 10^7}{f\zeta_0} = H + \zeta_0 \ln \frac{1.44 \cdot 10^{10}}{f\zeta_0^2}.$$

Комплексный синус угла падения для n -й моды и коэффициенты возбуждения можно выразить следующим образом [18]:

$$S_n \approx c_n + j \frac{\pi \delta_n \zeta_0}{4h}, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

где для нулевой моды ($n = 0$) $\delta_0 \cong 1$, $h = h_0$, $c_n \cong 1$; для высших мод ($n > 0$) $h = h_1$,

$$\delta_n \approx 2 \frac{c_n^2}{s_n}, \quad f > \sqrt{2} f_{cn},$$

$$\delta_n \approx 2s_n, \quad f < \sqrt{2} f_{cn}.$$

Здесь f_{cn} – частота отсечки n -й моды, $s_n = \sqrt{1 - c_n^2}$, $c_n = \frac{n\pi}{kh_1}$.

В расчетах используется модель процесса развития разряда молнии в виде разности двух экспонент, характеризующих нарастание и спад тока в разряде:

$$i(t) = I_0 (e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}). \quad (5)$$

Типичные значения параметров, задающих форму и амплитуду токового момента, составляют: $ds = 4$ км, $I_0 = 20$ кА, $\tau_1 = 3$ мкс, $\tau_2 = 40$ мкс. Спектральный состав токового момента (5) имеет следующий вид:

$$I(\omega) ds = \frac{I_0 ds (\tau_2 - \tau_1)}{1 - \omega^2 \tau_1 \tau_2 + j\omega(\tau_1 + \tau_2)}.$$

Волновые формы поля, возбуждаемого рядом молнии в волноводе Земля–ионосфера, рассчитывались путем применения обратного дискретного преобразования Фурье к спектрам поля, полученным на основе описанной выше модели.

4. Результаты статистического анализа

При расчете волновых форм твиков для вертикального профиля проводимости в (4) использовались параметры, типичные для ночных условий ионосферы: высота $H = 88$ км и локальный высотный масштаб $\zeta_0 = 2$ км.

Работа алгоритмов, реализующих оба метода, разделена на два этапа. На первом этапе выполняется перебор параметров с определением минимального значения функционала, представляющего собой среднеквадратическое отклонение экспериментальной и теоретической зависимости. Диапазоны перебора высоты h_1 и дистанции ρ в (3) составляют соответственно $85 \div 95$ км и $500 \div 6000$ км. На втором этапе задача сводится к минимизации данного функционала симплексным методом Нелдера–Мида [19], реализованным в пакете MATLAB, с первоначальным приближением искомых параметров, найденных на первом этапе.

Пример поверхности минимизирующего функционала при отношении сигнал/шум 25 дБ для фазового метода показан на рис. 4. Исходные значения параметров синтезированного твика:

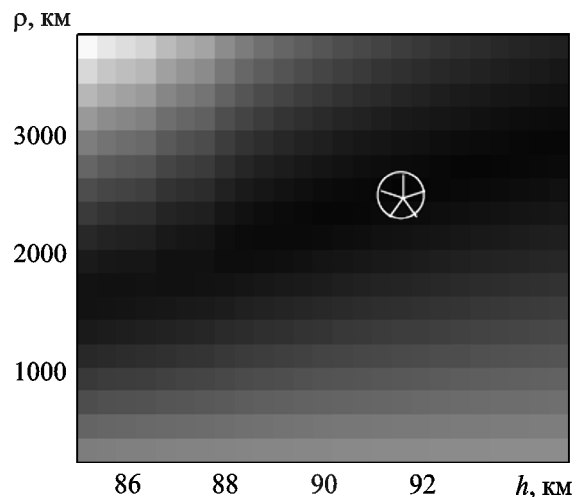


Рис. 4. Поверхность минимизирующего функционала для фазового метода

$\rho = 2500$ км, $h_1 = 91.37$ км (1-я мода). Аналогичный вид имеет и поверхность в случае частотного метода.

Можно отметить, что поверхность минимизирующего функционала имеет единственный глобальный минимум. Оценивая размеры этой области, можно оптимизировать шаг перебора параметров на первом этапе для уменьшения времени вычислений и увеличения точности результатов.

На графике белый кружок соответствует параметрам исходной модели твика, пятиконечная звезда – параметрам, полученным в результате минимизации функционала.

Для оценки систематических и случайных ошибок частотного и фазового методов был выполнен статистический анализ. С этой целью по каждому синтезированному с заданным набором параметров сигналу твика длительностью 40 мс были определены искомые параметры по 100 раз каждым методом. При этом каждый раз временная форма твика суммировалась с различными реализациями шума. Отношение сигнал/шум менялось в диапазоне от 25 до 40 дБ.

В табл. 1 представлены результаты анализа погрешностей фазового метода, ФМ, и частотного метода для первой–третьей мод, ЧМ1, ЧМ2 и ЧМ3.

Здесь M_h и M_ρ – систематические ошибки определения высоты и дистанции, σ_h , и σ_ρ , – случайные ошибки (среднеквадратические отклонения) оценок высоты и дистанции соответственно.

Результаты статистического анализа ошибок определения высоты волновода позволяют оценить возможность применения представленных методов для оценки параметров вертикального профиля проводимости ионосферы. Так, для указанных параметров профиля ионосферы, использованных при синтезе твиков в численном эксперименте, эффективные высоты для первых трех мод составляют: 89.53, 88.112 и 87.282 км. На рис. 5 эти значения показаны горизонтальными пунктирными линиями. Круглыми и треугольными маркерами обозначены данные систематических ошибок из табл. 1, приведенные к абсолютным значениям для трех мод, частотного и фазового метода соответственно. Вертикальными планками погрешностей показаны случайные ошибки.

5. Выводы

Результаты анализа двух методов показывают следующее. Фазовый метод дает лучшие оценки дальности до молнии, достигая максимальной

Таблица 1. Ошибки определения дальности до молнии и высоты волновода Земля–ионосфера фазовым (ФМ) и частотным (ЧМ1 – ЧМ3) методами

Метод	$\rho = 3000$ км				$\rho = 1500$ км				$\rho = 500$ км			
	$M_h, \%$	$\sigma_h, \%$	$M_\rho, \%$	$\sigma_\rho, \%$	$M_h, \%$	$\sigma_h, \%$	$M_\rho, \%$	$\sigma_\rho, \%$	$M_h, \%$	$\sigma_h, \%$	$M_\rho, \%$	$\sigma_\rho, \%$
ФМ, 25 дБ	0.11	0.11	-0.64	0.6	0.08	0.2	-0.13	1.16	0.83	0.85	5.6	4.6
ФМ, 30 дБ	0.10	0.07	-0.73	0.4	0.06	0.04	-0.25	0.21	0.64	0.63	4.4	3.6
ФМ, 35 дБ	0.07	0.05	-0.89	0.2	0.06	0.02	-0.27	0.13	0.64	0.31	4.5	1.8
ФМ, 40 дБ	0.06	0.02	-0.92	0.1	0.06	0.01	-0.27	0.07	0.68	0.16	4.9	0.9
ЧМ1, 25 дБ	0.42	0.3	3.5	3.0	0.47	0.21	5.16	3.39	0.46	2.23	23	29
ЧМ1, 30 дБ	0.52	0.3	4.4	2.5	0.47	0.09	4.34	3.53	0.32	1.39	22	19
ЧМ1, 35 дБ	0.64	0.1	5.6	0.7	0.25	0.04	3.83	1.94	0.2	0.94	20	14
ЧМ1, 40 дБ	0.65	0.01	5.7	0.1	0.16	0.01	3.59	1.33	0.13	0.69	19	11
ЧМ2, 25 дБ	-0.19	0.23	-3.6	2.7	0.05	0.19	0.63	1.63	0.84	1.01	24	15
ЧМ2, 30 дБ	-0.23	0.16	-3.9	1.8	0.02	0.08	0.60	0.86	0.58	0.74	20	12
ЧМ2, 35 дБ	-0.26	0.14	-4.2	1.6	0.02	0.04	0.67	0.44	0.23	0.56	14	12
ЧМ2, 40 дБ	-0.22	0.08	-3.9	0.9	0.03	0.02	0.75	0.23	0.13	0.37	12	10
ЧМ3, 25 дБ	-0.02	0.59	-2.8	9.7	-0.03	0.19	-1.5	2.1	0.60	0.65	17	11
ЧМ3, 30 дБ	-0.08	0.23	-2.7	3.5	-0.03	0.08	-1.2	1.9	0.25	0.42	11	9.7
ЧМ3, 35 дБ	-0.09	0.16	-2.6	2.2	-0.01	0.04	-0.6	1.0	0.16	0.33	9.5	9.4
ЧМ3, 40 дБ	-0.16	0.15	-3.4	1.9	0.004	0.02	-0.3	0.2	0.06	0.24	6.5	7.5

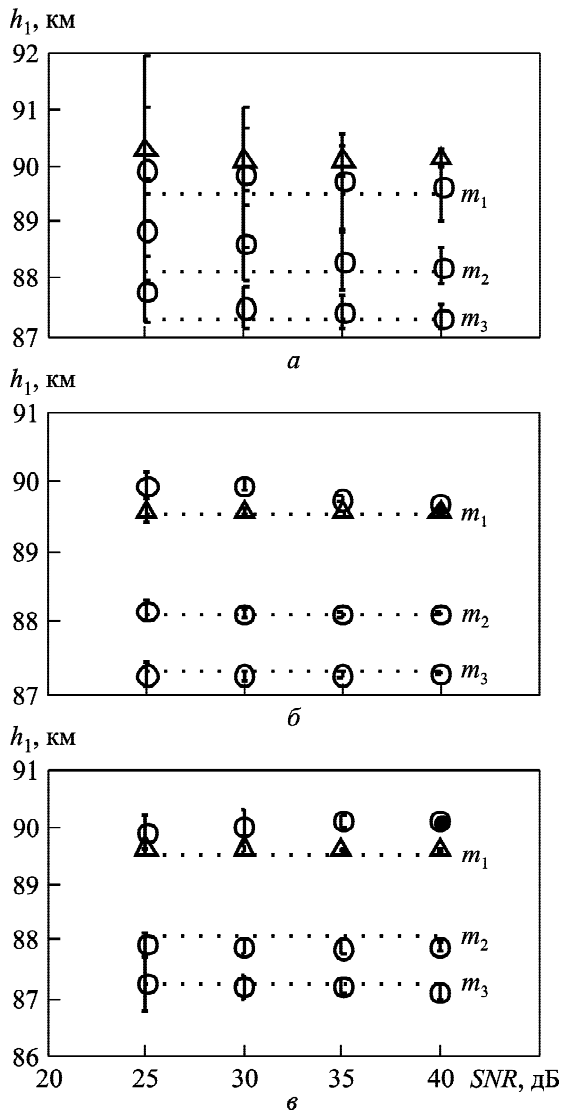


Рис. 5. Оценки высот волновода в зависимости от отношения сигнал/шум SNR фазовым (треугольники) и частотным (кружки) методами (1-я – 3-я моды) при дальности до молнии 500 км (а), 1500 км (б), 3000 км (в)

точности в середине исследованного интервала дальностей.

Наименьшая точность восстановления параметров наблюдается на нижней границе анализируемого диапазона дальностей – 500 км. Фазовый метод здесь дает несколько большее положительное смещение оценок высоты волновода по сравнению с частотным методом, однако обеспечивает существенно лучшие оценки дальности.

В середине и на верхней границе диапазона дальностей (1500 и 3000 км) фазовый метод обес-

печивает лучшую точность оценки высоты волновода для первой моды. Для мод второго и третьего порядков можно видеть хорошее совпадение с исходными значениями высоты h_1 , заложенными в модели волновода.

Для дальности 500 км оценки высоты в частотном методе оказываются завышенными для всех мод, однако при достаточно высоком отношении сигнал/шум они становятся сравнимыми с результатами для остального диапазона дальностей.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что фазовый метод обеспечивает лучшую точность определения дальности до молнии и высоты волновода для первой моды при дальности более 500 км, чем частотный метод. Таким образом, для увеличения точности определения эффективных высот волновода Земля–ионосфера для нормальных волн основного и высших типов по сигналам многомодовых твигов можно воспользоваться комбинацией фазового и частотного методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wait J. R. *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. – Oxford, England: Pergamon Press, 1962.
2. Hughes H. G., Gallenberger R. J., and Pappert R. A. Evaluation of nighttime exponential ionospheric models using VLF atmospherics // *Radio Sci.* – 1974. – Vol. 9, No. 12. – P. 1109–1116. DOI: 10.1029/RS009i012p01109
3. Cummer S. A., Inan U. S., and Bell T. F. Ionospheric D-region remote sensing using VLF radio atmospherics // *Radio Sci.* – 1998. – Vol. 33, No. 6. – P. 1781–1792. DOI: 10.1029/98RS02381
4. Cheng Z. and Cummer S. A. Broadband VLF measurements of lightning-induced ionospheric perturbations // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32, Is. 8. – id. L08804. DOI: 10.1029/2004GL022187
5. Cheng Z., Cummer S. A., Su H.-T., and Hsu R.-R. Broadband very low frequency measurement of D region ionospheric perturbations caused by lightning electromagnetic pulses // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112, Is. A6. – id. A06318. DOI: 10.1029/2006JA011840
6. Shao X.-M., Lay E. H., and Jacobson A. R. Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm // *Nature Geosci.* – 2013. – Vol. 6, No. 1. – P. 29–33. DOI: 10.1038/ngeo1668
7. Burton E. T. and Boardman E. M. Audio-frequency atmospherics // *Proc. IRE.* – 1933. – Vol. 21, Is. 10. – P. 1476–1494. DOI: 10.1109/JRPROC.1933.227485
8. Barkhausen H. Whistling tones from the Earth // *Proc. IRE.* – 1930. – Vol. 18, Is. 7. – P. 1155–1159. DOI: 10.1109/JRPROC.1930.222122

9. Potter R. K. Analysis of audio-frequency atmospheric // Proc. IRE. – 1951. – Vol. 39, Is. 9. – P. 1067–1069. DOI: 10.1109/JRPROC.1951.273750
10. Ohya H., Shiokawa K., and Miyoshi Y. Development of an automatic procedure to estimate the reflection height of tweek atmospherics // Earth Planets Space. – 2008. – Vol. 60, Is. 8. – P. 837–843. DOI: 10.1186/BF03352835
11. Iwai A., Kashiwagi M., Nishino M., and Satoh M. Triangulation direction finding network for fixing the sources of atmospherics // Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ. – 1979. – Vol. 26. – P. 1–16.
12. Rodger C. J., Brundell J. B., and Dowden R. L. Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network: Post-algorithm upgrade // Ann. Geophys. – 2005. – Vol. 23, Is. 2. – P. 277–290. DOI: 10.5194/angeo-23-277-2005
13. Otsu J. Numerical study of tweeks based on waveguide mode theory // Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ. – 1960. – Vol. 7. – P. 58–71.
14. Rafalsky V. A., Shvets A. V., and Hayakawa M. One-site distance-finding technique for locating lightning discharges // J. Atmos. Terr. Phys. – 1995. – Vol. 57, Is. 11. – P. 1255–1261. DOI: 10.1016/0021-9169(95)00011-P
15. Швец А. В., Кривонос А. П., Сердюк Т. Н., Горюшня Ю. В. Обратная задача восстановления параметров волновода Земля-ионосфера, возбуждаемого разрядом молнии // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2013. – Т. 3(36). – С. 84–90.
16. Wait J. R. and Spies K. P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. In: NBS Technical Note 300. – Washington, DC: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1964.
17. Greifinger C. and Greifinger P. Approximate method for determining ELF eigenvalues in the earth-ionosphere waveguide // Radio Sci. – 1978. – Vol. 13, No. 5. – P. 831–837. DOI: 10.1029/RS013i005p00831
18. Porrat D., Bannister P. R., and Fraser-Smith A. C. Modal phenomena in the natural electromagnetic spectrum below 5 kHz // Radio Sci. – 2001. – Vol. 36, No 3. – P. 499–506. DOI: 10.1029/2000RS002506
19. Nelder J. A. and Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // Comput. J. – 1965. – Vol. 7, No. 4. – P. 308–313.
20. bations. *Geophys. Res. Lett.* vol 32, is. 8, id. L08804. DOI: 10.1029/2004GL022187
21. CHENG, Z., CUMMER, S. A., SU, H.-T. and HSU, R.-R., 2007. Broadband very low frequency measurement of D region ionospheric perturbations caused by lightning electromagnetic pulses. *J. Geophys. Res.* vol. 112, is. A6, id. A06318. DOI: 10.1029/2006JA011840
22. SHAO, X.-M., LAY, E. H. and JACOBSON, A. R., 2013. Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm. *Nature Geosci.* vol. 6, no. 1, pp. 29–33. DOI: 10.1038/ngeo1668
23. BURTON, E. T. and BOARDMAN, E. M., 1933. Audio-frequency atmospheric. *Proc. IRE.* vol. 21, is. 10, pp. 1476–1494. DOI: 10.1109/JRPROC.1933.227485
24. BARKHAUSEN, H., 1930. Whistling tones from the Earth. *Proc. IRE.* vol. 18, is. 7, pp. 1155–1159. DOI: 10.1109/JRPROC.1930.222122
25. POTTER, R. K., 1951. Analysis of audio-frequency atmospheric. *Proc. IRE.* vol. 39, is. 9, pp. 1067–1069. DOI: 10.1109/JRPROC.1951.273750
26. OHYA, H., SHIOKAWA, K. and MIYOSHI, Y., 2008. Development of an automatic procedure to estimate the reflection height of tweek atmospherics. *Earth Planets Space.* vol. 60, is. 8, pp. 837–843. DOI: 10.1186/BF03352835
27. IWAI, A., KASHIWAGI, M., NISHINO, M. and SATOH, M., 1979. Triangulation direction finding network for fixing the sources of atmospherics. *Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ.* vol. 26, pp. 1–16.
28. RODGER, C. J., BRUNDELL, J. B. and DOWDEN, R. L., 2005. Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network: Post-algorithm upgrade. *Ann. Geophys.* vol. 23, is. 2, pp. 277–290. DOI: 10.5194/angeo-23-277-2005
29. OTSU, J., 1960. Numerical study of tweeks based on waveguide mode theory. *Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ.* vol. 7, pp. 58–71.
30. RAFALSKY, V. A., SHVETS, A. V. and HAYAKAWA, M., 1995. One-site distance-finding technique for locating lightning discharges. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 57, is. 11, pp. 1255–1261. DOI: 10.1016/0021-9169(95)00011-P
31. SHVETS, A. V., KRIVONOS, A. P., SERDIUK, T. N. and GORYSHNYA, Yu. V., 2013. An inverse problem of recovering parameters of the Earth-ionosphere waveguide excited by a lightning discharge. *Zbirnik naukovih prats Harkivskogo universitetu Povitryanih Sil.* vol. 3(36), pp. 84–90 (in Russian).
32. WAIT, J. R. and SPIES, K. P., 1964. *Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves.* In: *NBS Technical Note 300.* Washington, DC: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.
33. GREIFINGER, C. and GREIFINGER, P., 1978. Approximate method for determining ELF eigenvalues in the earth-ionosphere waveguide. *Radio Sci.* vol. 13, no. 5, pp. 831–837. DOI: 10.1029/RS013i005p00831
34. PORRAT, D., BANNISTER, P. R. and FRASER-SMITH, A. C., 2001. Modal phenomena in the natural electromagnetic spectrum below 5 kHz. *Radio Sci.* vol. 36, no 3, pp. 499–506. DOI: 10.1029/2000RS002506

REFERENCES

1. WAIT, J. R., 1962. *Electromagnetic Waves in Stratified Media.* Oxford, England: Pergamon Press.
2. HUGHES, H. G., GALLENBERGER, R. J. and PAPER, R. A., 1974. Evaluation of nighttime exponential ionospheric models using VLF atmospheric. *Radio Sci.* vol. 9, no. 12, pp. 1109–1116. DOI: 10.1029/RS009i012p01109
3. CUMMER, S. A., INAN, U. S. and BELL, T. F., 1998. Ionospheric D-region remote sensing using VLF radio atmospheric. *Radio Sci.* vol. 33, no. 6, pp. 1781–1792. DOI: 10.1029/98RS02381
4. CHENG, Z. and CUMMER, S. A., 2005. Broadband VLF measurements of lightning-induced ionospheric pertur-

19. NELDER, J. A. and MEAD, R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *Comput. J.* vol 7, no. 4, pp. 308–313.

A. P. Krivonos and A. V. Shvets

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, 12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF EVALUATING THE LOWER IONOSPHERE PARAMETERS BY TWEAK ATMOSPHERICS

Purpose: A comparative analysis of the phase and frequency methods for determining the Earth-ionosphere effective waveguide heights for the basic and higher types of normal waves (modes) and distance to the source of radiation – lightning – has been made by analyzing pulse signals in the ELF-VLF range – tweek-atmospherics (tweeks).

Design/methodology/approach: To test the methods in computer simulations, the tweeks waveforms were synthesized for the Earth-ionosphere waveguide model with the exponential conductivity profile of the lower ionosphere. The calculations were made for a 20–40 dB signal/noise ratio.

Findings: The error of the frequency method of determining the effective height of the waveguide for different waveguide modes was less than 0.5 %. The error of the phase method for determining the effective height of the waveguide was less than 0.8 %. Errors in determining the distance to the lightning was less than 1 % for the phase method, and less than 5 % for the frequency method for the source ranges 1000–3000 km.

Conclusions: The analysis results have showed the accuracy of the frequency and phase methods being practically the same within distances of 1000–3000 km. For distances less than 1000 km, the phase method shows a more accurate evaluation of the range, so the combination of the two methods can be used to improve estimating the tweek's propagation path parameters.

Key words: lightning location, diagnostics of the lower ionosphere, ELF-VLF radio waves, tweek-atmospherics

О. П. Кривonos, О. В. Швець

Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТВІК-АТМОСФЕРИКІВ

Предмет і мета роботи: Виконано порівняльний аналіз фазового і частотного методів визначення ефективних висот хвилеводу Земля–іоносфера для основного та вищих типів нормальних хвиль (мод) і дальності до джерела випромінювання – блискавки – на основі аналізу імпульсних сигналів у діапазоні наднизьких і дуже низьких частот – твік-атмосфериків (твіків).

Методи і методологія: У числовому експерименті з метою тестування методів хвильові форми твіків синтезовано в моделі хвилеводу Земля–іоносфера з експоненціальним профілем провідності нижньої іоносфери. Обчислення виконувалися для відношення сигнал/шум 20 ÷ 40 дБ.

Результати: Похибка частотного методу визначення ефективної висоти хвилеводу для різних хвилеводних мод склала менше 0.5 %. Похибка фазового методу визначення ефективної висоти хвилеводу склала менше 0.8 %. Похибки визначення дальності до блискавки склали менше 1 % для фазового методу і менше 5 % для частотного методу в діапазоні відстаней 1000 ÷ 3000 км.

Висновок: Результати виконаного аналізу показали, що точності частотного і фазового методів практично збігаються в діапазоні дальностей 1000 ÷ 3000 км. Для дальностей до 1000 км фазовий метод показує точніші оцінки за дальністю, тому комбінація двох методів може бути використана для поліпшення оцінок параметрів траси поширення твіків.

Ключові слова: локація блискавок, діагностика нижньої іоносфери, ННЧ–ДНЧ радіохвилі, твік-атмосферики

Стаття поступила в редакцію 12.10.2016 г.