

*А.А. КОЛЧЕВ*, канд. физ.-мат. наук, доц., МарГУ, Йошкар-Ола, Россия  
*А.О. ЩИРЫЙ*, канд. техн. наук, МарГУ, Йошкар-Ола, Россия

## **МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КВ РАДИОЛИНИЙ В ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ**

В работе разработана и реализована модель для вычисления амплитудно-частотных характеристик коротковолновых радиолоний по результатам зондирования широкополосным сигналом с линейной частотной модуляцией. Модель предполагает приближение геометрической оптики. Адекватность модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

We developed and implemented a model to calculate the amplitude-frequency characteristics of the shortwave radio on the results of probing a broadband signal with linear frequency modulation. The model assumes the approximation of geometric optics. The adequacy of the model is confirmed by experimental studies.

**Постановка задачи.** Коротковолновым (КВ) ионосферным радиолониям протяженностью сотни-тысячи километров присуща многолучевость распространения радиосигнала. Использование узкополосных каналов в традиционных системах связи не позволяет разделять по задержке принимаемые парциальные моды, соответствующие разным лучам, и они интерферируют между собой, в результате амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) линии связи становится изрезанной. Ей присущи подъемы, соответствующие полосам конструктивной интерференции, и провалы, обусловленные деструктивной интерференцией. Для устойчивой работы радиотехнической системы её радиоканал должен быть вложен в полосу конструктивной интерференции. Таким образом, возникает проблема определения АЧХ линии связи с высоким частотным разрешением, а также исследования характеристик АЧХ радиолонии: глубин провалов и частотных полос конструктивной интерференции.

Использование широкополосных сигналов (в широкополосных каналах) позволяет разделить принимаемые моды и, кроме того, предполагает оптимальную обработку сигнала в приемнике. При этом оптимизация осуществляется по отношению к излучаемому сигналу. Однако при распространении в ионосферном радиоканале, амплитуды и фазы спектральных составляющих парциальных мод сигнала искажаются, в результате чего оптимальность приема утрачивается. Для компенсации искажений широкополосных радиосигналов также должна быть решена задача определения АЧХ радиолонии.

Существующие подходы к решению задачи измерения АЧХ радиолинии и её характеристик можно разделить на две группы:

- 1) непосредственное измерение;
- 2) использование радиофизических моделей.

Так форму амплитудно-частотной характеристики различных радиолиний традиционно определяют путем непосредственного измерения коэффициентов передачи в требуемом диапазоне частот (например [1 – 3]).

**Анализ литературы.** Известны результаты определения статистических характеристик АЧХ с помощью гармонического сигнала, когда экспериментальные законы распределения аппроксимировались известными (нормальный, Релея, Райса, Накагами, см. например [4 – 6]).

Для непосредственного измерения коэффициента передачи обычно в качестве зондирующего используется гармонический сигнал. Примером устройств этого класса может служить “Невод-200” [2, 3].

При таком измерении коэффициентов передачи радиолинии первая проблема заключается в наличии помех: в ДКМ диапазоне станционными помехами (которые невозможно отличить от гармонического пробного сигнала) может быть “забит” практически весь частотный диапазон прохождения радиоволн. Для исключения влияния постоянно работающих мощных радиостанций, предлагаемое в [2, 3] усреднение по времени не поможет, а значит в каналах, занятых мощными радиостанциями, коэффициент передачи измерить нельзя. Таким образом, этот подход можно использовать только для диагностики радиолинии на фиксированных частотах, при условии, что эти частоты с высокой вероятностью свободны от станционных помех (т.к. эти частоты выделенные). Однако, существуют непреднамеренные и индустриальные помехи, которыми могут быть забиты любые каналы. Поэтому (и это вторая проблема), невозможно получить панораму АЧХ радиолинии.

По этим причинам для исследования свойств АЧХ многолучевой КВ радиолинии используют радиофизические модели. Однако, чаще всего целью таких исследований ставится не моделирование “тонких” эффектов многолучевого распространения, а получение АЧХ с низким разрешением – порядка 1 МГц [7 – 9]. К этой же группе моделирования “нетонкой” структуры АЧХ можно отнести и методы моделирования напряженности поля в точке приема (например, [10]).

В отечественной литературе задача оценки тонкой структуры АЧХ многолучевой КВ радиолинии была поставлена в работе [11], там же предложены некоторые возможные подходы к решению. Однако, эти рекомендации построены на основе предположений и допущений, недостаточно подкрепленных экспериментальными данными. О неверности этих допущений можно судить, сравнивая полученные авторами работ результаты с данными зондирования ионосферы.

Таким образом, даже в тех случаях, когда ставилась [11] задача исследования тонкой структуры АЧХ многолучевой КВ радиолинии, она решалась на основе упрощенных, и даже неверных положений. Поэтому, АЧХ многолучевой КВ радиолинии должна вычисляться по таким характеристикам радиолинии, которые можно непосредственно измерить.

В работах [12, 13] была решена задача определения комплексных передаточных функций парциальных мод распространения КВ радиосигнала на основе данных наклонного зондирования КВ радиолиний линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом.

Выбранный в качестве зондирующего ЛЧМ сигнал, благодаря своим свойствам [14], и в отличие от гармонического сигнала, может быть выделен из сосредоточенных помех.

**Цель статьи** – построение модели для вычисления АЧХ КВ радиолинии.

**Математическая модель.** Применение ЛЧМ сигнала в качестве зондирующего, позволяет разделить при приеме парциальные моды распространения КВ радиосигнала и измерить их характеристики. Для оценки с высоким частотным разрешением АЧХ многолучевой КВ радиолинии с помощью ионозонда наклонного зондирования ионосферы (НЗИ), использующего сигналы с ЛЧМ, была построена математическая модель, суть которой заключается в следующем.

В приемнике ЛЧМ-ионозонда происходит сжатие принятого сигнала в частотной области, состоящее в его умножении на сигнал гетеродина, комплексно-сопряженный излучаемому сигналу и дальнейшему спектральному анализу сигнала разностной частоты, в результате чего дискретные моды распространения сигнала разделяются по задержке. Результатом работы ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимость амплитуды сигнала от частоты  $f$  и времени группового запаздывания  $\tau(f)$ .

В приближении геометрической оптики передаточную функцию радиоканала с дискретной многолучевостью можно представить в виде суммы передаточных функций  $m$  отдельных лучей  $H_j(f)$ :

$$H(f, t) = \sum_{j=1}^m H_j(f, t). \quad (1)$$

Передаточную функцию отдельного луча с амплитудой  $|H_{j, f}|$  и фазой  $\varphi_j(f)$  можно записать в виде:

$$H_j(f, t) = |H_j(f)| e^{-i\varphi_j(f, t)}. \quad (2)$$

Известно, что при полосе канал  $\Delta f \ll f_p$  ( $f_p$  – рабочая частота) и для интервалов времени  $\Delta t$  порядка длительности посылки амплитуду детерминированной части можно считать постоянной и отнести к рабочей частоте канала, а фазу можно разложить в ряд Тейлора:

$$\varphi_j(f, t) \approx \varphi_j(f_p, t_0) + 2\pi\tau_j(f_p)\Delta f + 2\pi F_d \Delta t. \quad (3)$$

Также в выражении фазы учитывается вклад доплеровского смещения частоты  $F_d$  [13]. Оно влияет не на форму АЧХ, а на ее дрейф по оси частот.

Следует отметить, что приведенные выражения не учитывают рассеяние луча при отражении, вызывающее диффузность трека моды на ионограмме.

Для получения аналитического выражения  $\tau_j(f)$  на ионограмме наклонного ЛЧМ-зондирования радиолинии выделяются треки парциальных мод КВ радиосигнала (рис. 1). Ионозонд дает дискретные числовые значения  $\tau_j(f)$  и  $|H_f, f|$  через 20 – 100 кГц (рис. 2а, б). Для реализации предлагаемого подхода необходимы их непрерывные модели. Для построения непрерывной модели  $\tau_j(f)$  производится аппроксимация полиномами  $n$ -ой степени ( $n = 1..4$  и зависит от протяженности радиолинии и порядка моды). Амплитуда  $|H_f, f|$  для удаления одиночных выбросов подвергается медианной фильтрации (на рис. 2б показан пример АЧХ моды до медианной фильтрации тонкая линия, после – толстая). Апертура медианного фильтра  $N = 6$  (для сглаживания одно- и двухточечных выбросов). Далее для построения непрерывной модели  $|H_f, f|$  производится кусочно-линейная аппроксимация.

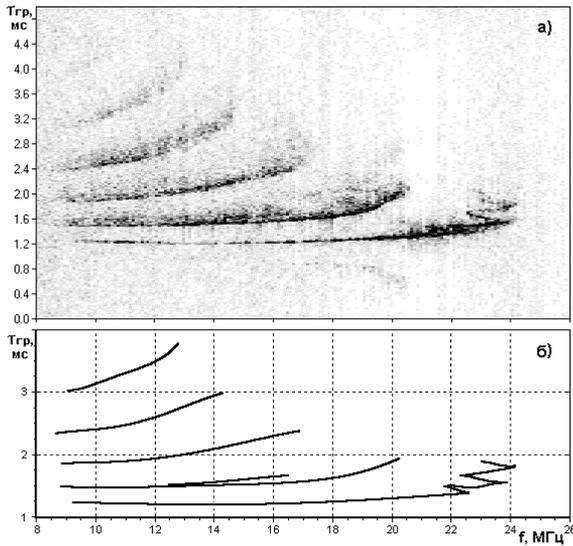


Рис. 1. Ионограмма (а) и выделенные треки парциальных мод (б)

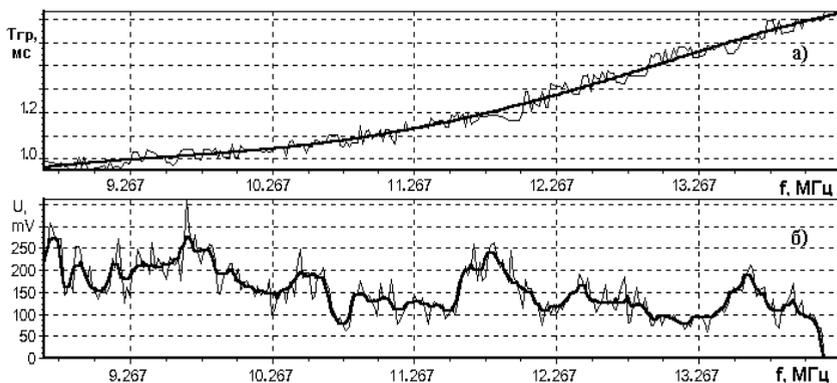


Рис. 2. Траектория моды, сглаженная полиномом (а) и АЧХ этой моды до (тонкая линия) и после (толстая) медианной фильтрации

В результате, получается следующее выражение для оценки АЧХ многолучевой ионосферной КВ радиолнии [2]:

$$|H(f, t)| = \left| \sum_{j=1}^m |H_j(f)| e^{-i \left( \varphi_j(f, t_0) + 2\pi \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_{jk}}{k+1} ((f+\Delta f)^{k+1} - f^{k+1}) + 2\pi F_j \Delta t \right)} \right| \quad (4)$$

Параметрами используемой модели АЧХ являются амплитуды мод КВ радиосигнала и межмодовые задержки (разности времен их группового запаздывания). Пример фрагмента вычисленной АЧХ многолучевой КВ радиолнии показан на рис. 3.

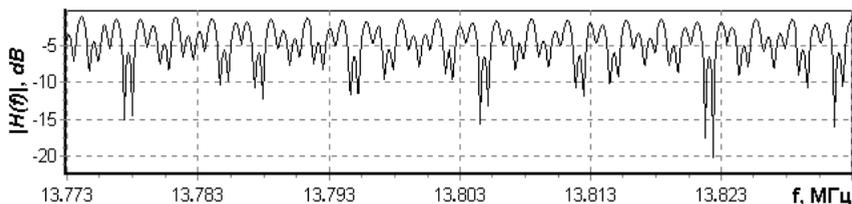


Рис. 3. Фрагмент вычисленной АЧХ

Известно что, огибающая временного ряда сигнала разностной частоты ЛЧМ ионозонда подобна АЧХ многолучевой КВ радиолнии при условии отсутствия помех. Было проведено сравнение вида огибающей указанного сигнала с полученной АЧХ радиолнии для соответствующего частотного диапазона [15]. Для этого брались участки ионограмм без стационарных

помех и с четкими не диффузными треками. Фрагментов ионограммы, удовлетворяющих таким условиям, относительно мало. Если бы они составляли существенную часть ионограммы, задача оценки АЧХ КВ радиолинии, могла бы быть сведена к отысканию огибающей временного ряда сигнала разностной частоты. Результаты сопоставления [15] подтвердили адекватность построенной модели.

**Выводы.** Разработана модель для вычисления АЧХ многолучевых ионосферных КВ радиолиний по данным НЗИ, позволяющая получать панораму АЧХ с высоким частотным разрешением.

**Список литературы:** 1. А.с. 1305880 СССР, МПК Н04В 3/46. Способ измерения характеристики группового времени замедления и амплитудно-частотной характеристики канала связи / *А.Д. Зорев* (СССР). – 4475118/24-09; Заявлено 08.08.88; Опубл. 07.10.90; Бюл. № 37. – 4 с.; ил. 2. *Брянцев В.Ф.* К методике измерений средних характеристик радиосигналов на трассах наклонного зондирования / *В.Ф. Брянцев, А.И. Ежов, Л.М. Красильникова, Ю.Г. Тихонов* // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца – М., 1984. – Вып.67. – С. 188 – 196. 3. *Брянцев В.Ф.* Измерения АЧХ при наклонном зондировании ионосферы широкополосными сигналами / *В.Ф. Брянцев, А.С. Стародубровский* // Труды всероссийской научной конференции “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”, Муром. – Муром, 2003. – С. 263 – 266. 4. *Nokagami M.* Statistic Methods in Radio Wave Propagation. – Pergamon Press, 1960. 5. *Алимов В.А., Ерухимов Л.М.* К вопросу о глубоких замираниях КВ сигналов / *В.А. Алимов, Л.М.Ерухимов* // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18. № 7. – С. 948 – 957. 6. *Вовк В.Я.* Измерение амплитудных характеристик многомодового сигнала при НЗ на субавроральной радиолинии / *В.Я. Вовк, И.А. Шумилов* // Тр. Аркт. и Антаркт. НИИ. – 1991. – № 427. – С. 131 – 138. 7. *Барабашев Б.Г.* Динамическая адаптивная структурно-физическая модель ионосферного радиоканала / *Б.Г. Барабашев., Г.Г. Вертоградов* // Математическое моделирование. – 1996. – Т. 8, № 2. – С. 3 – 18. 8. *Куницин В.Е.* Амплитудно-и фазочастотные характеристики вертикального радиозондирования магнитоактивной ионосферы / *В.Е. Куницин, А.Б. Усачев* // Радиотехника. – 1991. – № 1. – С. 8 – 10. 9. *Анишин М.М.* Моделирование и исследование полей декаметровых волн: Автореф... канд. техн. наук / *М.М. Анишин* // РГУ. – Ростов-на-Дону, 2003. – 22 с. 10. Документы XI Пленарной Ассамблеи МККР: В 5-ти т., Осло, 1966. Пер. с англ. – М.: Связь, 1968. 11. *Терехов Л. С.* Повышение точности радиозондирования ионосферы / *Л. С. Терехов, В.А. Шапцев* – Новосибирск: Изд. СО РАН, 1997. – 131 с. 12. *Колчев А.А.* Исследование ионосферных каналов распространения ДКМВ для сигналов с расширенным спектром: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / *А.А. Колчев* // КГУ. – Казань, 1996. 13. *Иванов В.А.* Определение передаточной функции широкополосного КВ – радиоканала для отдельных мод распространения / *В.А. Иванов, А.А. Колчев, В.В. Шумаев* // Проблемы дифракции и распространение волн: Межвед. сб. – М.: МФТИ, 1995. – С. 122 – 131. 14. *Колчев А.А.* Режекция сосредоточенных по спектру помех при ЛЧМ зондировании ионосферы / *А.А. Колчев, А.О. Щирый* // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, № 9. – С. 751 – 759. 15. *Колчев А.А.* Сопоставление огибающей сигнала разностной частоты на выходе ЛЧМ-ионозонда с АЧХ КВ радиолинии, вычисленной на основе полумпирической модели / *А.А. Колчев, В.В. Шумаев, А.О. Щирый* // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике”. – 2006. – С. 336 – 340.

*Поступила в редколлегию 06.09.2011*