

Определение параметров сигналов СДВ-диапазона во время солнечного затмения

В.И. Нестеров

Тихоокеанский государственный университет
680035, Россия, г. Хабаровск
ул. Тихоокеанская, 136

Рассматриваются результаты исследования распространения радиоволн СДВ-диапазона во время нескольких солнечных затмений. Данные представлены для трасс различной длины. Приводится методика расчета эффективной высоты отражения ионосферы в зависимости фазы затмения Солнца. Показаны изменения фазы принимаемого сигнала для двух полных солнечных затмения.

Ключевые слова: СДВ-диапазон, фаза принимаемого сигнала, фаза затмения Солнца, терминатор.

Введение

Как уже отмечалось в предыдущих работах, посвященных солнечным затмениям, во время этих событий в нижних слоях ионосферы достаточно четко фиксируются изменения при регистрации фазы СДВ-сигналов, распространяющихся на трассах, пересекающих область затмения [1, 2]. В работе [2] представлены результаты полного солнечного затмения 31 июля 1981 года для нескольких трасс. Как было отмечено в данной статье, не все результаты фазы принимаемых сигналов можно интерпретировать с точки зрения влияния фазы затмения Солнца.

Основой для измерения фазы сигналов радионавигационной системы «Омега» относительно вторичного эталона времени и частоты является аппаратура, разработанная автором [3, 4]. Данная аппаратура использовалась не только в метрологии для привязки эталонов времени и частоты, но также для исследования характеристик дальнего и ближнего полей радиоволн СДВ-диапазона. В данных работах показаны некоторые результаты исследований фазы принимаемых сигналов для различных трасс.

Солнечное затмение приводит к уменьшению плотности электронов в нижней ионосфере (D-слой), которая, в свою очередь, ведет к увеличению эффективной высоты отражения радиоволн СДВ-диапазона. Экспериментально это рассматривается как увеличение фазового пути волн данного диапазона при пересечении области затмения. Измерения фазы принимае-

мого сигнала, связанные во времени с вариациями отклика ионосфера во время солнечного затмения, могут оказаться полезными при исследовании времени реакции D-слоя. В этой связи важность затмения состоит в точности, с помощью которой можно рассчитать изменение освещенности трассы распространения сигнала во время затмения. Соответственно, измерения фазы принимаемых сигналов данного диапазона радиоволн могут служить источником дополнительной информации о влиянии Солнца на параметры волнового поля Земля – ионосфера.

На длинных трассах преимущественно применяется модовая теория распространения, и связанные с солнечным затмением фазовые эффекты могут быть интерпретированы как увеличение фазовой скорости доминирующей моды распространения при пересечении зоны затмения.

Рассмотрим более подробно условия полного солнечного затмения 16 февраля 1980 года. Солнечное затмение началось в $7^{\text{h}} 12,8^{\text{m}}$ по всемирному времени (UT) (далее в тексте указано всемирное время) при восходе Солнца в акватории Атлантического океана с западной долготой $14^{\circ}58'$ и южной широтой $1^{\circ}23'$. Лунная тень сошла с Земли в $10^{\text{h}} 35,1^{\text{m}}$ UT при заходе Солнца в точке с координатами – восточная долгота $108^{\circ}22'$ и северная широта $26^{\circ}35'$. Данное солнечное затмение наблюдалось на территории юго-восточной части Атлантического океана, Африке, Индийском океане, юго-западной части Азии. На рис. 1 показана геометрия солнечного затмения. Так-

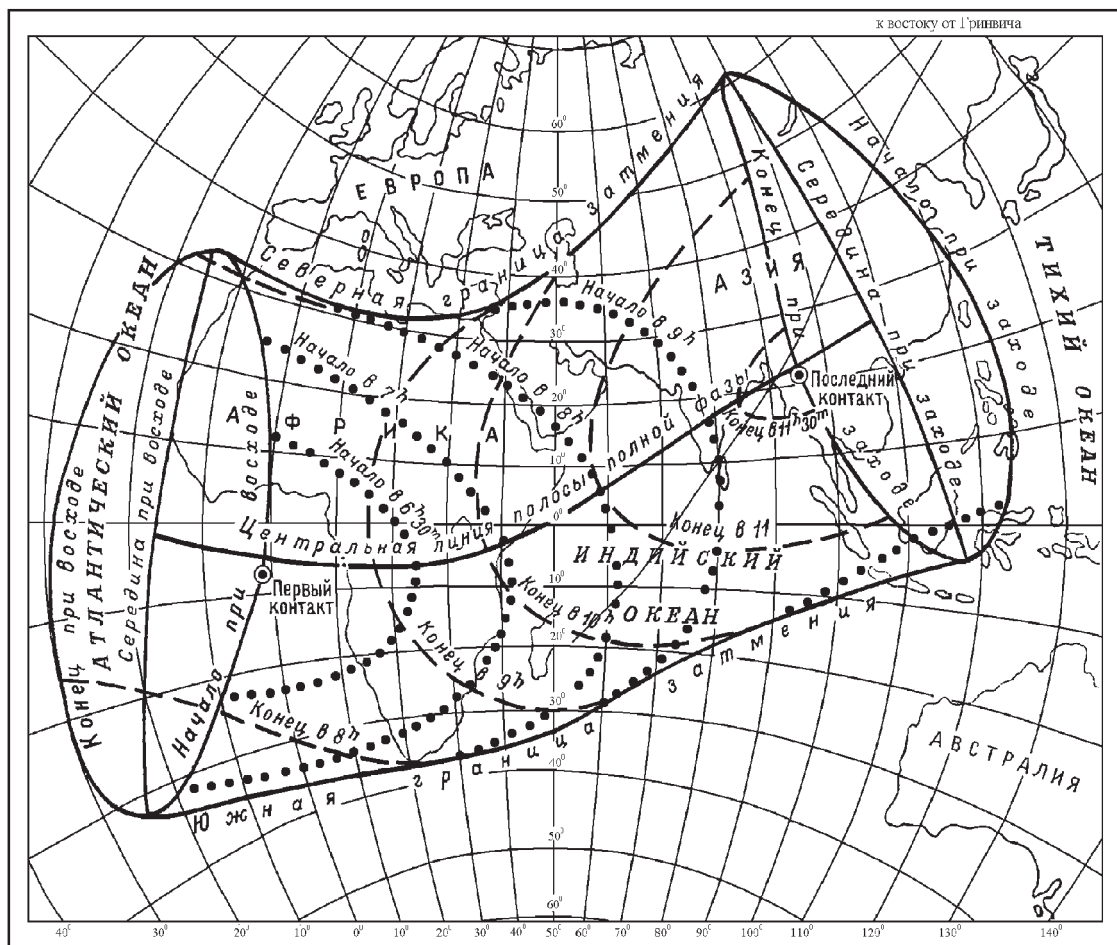


Рис. 1. Трасса распространения РНС «Омега» (Ля Реюньон) – Хабаровск и движение лунной тени во время полного солнечного затмения 16 февраля 1980 года

же приведена трасса распространения сигналов РНС «Омега» (Ля Реюньон) – Хабаровск.

Другое полное солнечное затмение, которое также здесь рассматриваем, состоялось 11 июня 1983 года. Оно началось в $3^h 12,1^m$ UT при восходе Солнца в акватории Индийского океана с западной долготой $59^\circ 57'$ и южной широтой $36^\circ 12'$. Лунная тень сошла с Земли в $6^h 15,1^m$ при заходе Солнца в точке с координатами – восточная долгота $168^\circ 16'$ и южная широта $18^\circ 04'$. Полное солнечное затмение наблюдалось на территории Индийского океана, Австралии, Тихом океане, юго-восточной части Азии.

На рисунке также отмечена трасса РНС «Омега» (Австралия) – Хабаровск.

Необходимо обратить внимание на геометрию центральной линии полосы полной фазы и положение трассы распространения сигналов. В первом случае угол линии полной фазы – трасса составляет порядка 40° , во втором – около 100° .

Методика обработки сигналов для выявления эффектов, связанных с солнечным затмением, приведена в [2]. Как видно из рис. 1, основные

события необходимо рассматривать примерно с 8^h UT и до конца прохождения лунной тени по поверхности Земли.

1. «Космическая» погода

Как известно, спектр излучения Солнца близок к спектру абсолютно черного тела, нагретого до температуры 5770 К при существенном дефиците излучаемой энергии в диапазоне близкого ультрафиолета (УФ). В то же время интенсивность солнечной радиации в далеком УФ и рентгеновском диапазоне на несколько порядков больше соответствующего излучения абсолютно черного тела. Такое различие в спектрах Солнца и абсолютно черного тела объясняется тем, что коротковолновое излучение в различных диапазонах длин волн генерируется в различных областях атмосферы Солнца [5].

Рассматриваемые солнечные затмения припадают на 21 солнечный цикл, который начался в сентябре 1976 года и закончился в августе 1986 года [6]. На рис. 2 приведено число солнечных пятен за указанный солнечный цикл. Как

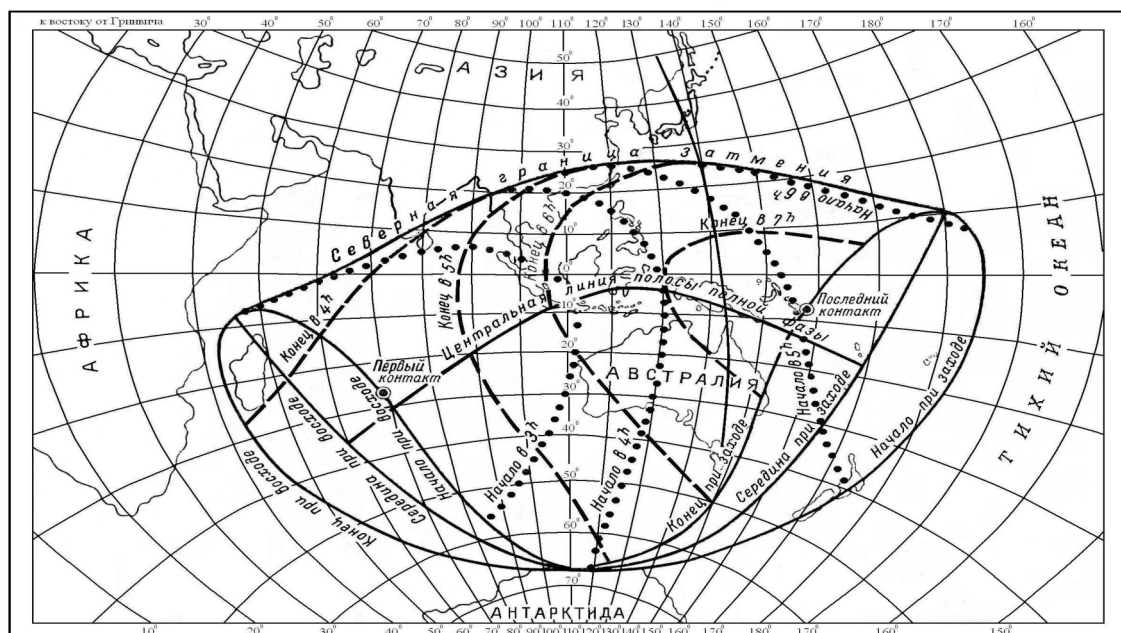


Рис. 2. Трасса распространения РНС «Омега» (Австралия) – Хабаровск и движение лунной тени во время полного солнечного затмения 11 июня 1983 года

видно из этого графика, солнечные затмения, которые рассматриваются в данной работе, приходятся на максимум, или убывающую ветвь, солнечной активности.

Состояние «космической» погоды удобно представить в виде временных вариаций плотности потоков частиц солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, индексов авроральной и геомагнитной активностей (AE , K_p и D_{st}) [7].

Состояние «космической» погоды 16 февраля 1980 года. Рассматривался периода с 14–18 февраля. 14 февраля с 9^h UT до 18^h UT магнитное поле было возмущенным (индекс геомагнитной активности K_p изменялся в пределах 1–5 единиц, а индекс $A_p = 18$). Значения индексов авроральной и геомагнитной активностей, состояния магнитного поля Земли, параметров солнечного ветра брались из «Solar-Geophysical Data» [6] и Мирового центра данных C2 [8]. Индекс D_{st} -вариаций геомагнитного поля в этот день измерялся в пределах от 13 до –43 нТл, индекс авроральной активности AE не превышал 800 нТл.

Значительная активность геомагнитного поля произошла в день солнечного затмения 16 февраля. Время солнечного затмения сопровождалось магнитной бурей (индексы K_p изменялись в пределах 3–6, $A_p = 40$). Индекс D_{st} – от –5 до –132 нТл, индекс AE не превышал 860 нТл. Поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см $F_{10.7}$ изменялся от 180 до 215 единиц, а в день солнечного затмения – 200. Скорость солнечного ветра V_{SW} в рассматриваемый период

достигала значений 300–490 км/с, температура T частиц – $(0,2–1,4) \cdot 10^5$ К, их концентрация варьировалась в пределах $(22–41) \cdot 10^6$ м^{–3}, давление солнечного ветра p_{SW} не превышало 15,8 нПа. Таким образом, перед солнечным затмением и в этот день наблюдалась геомагнитная буря, а после затмения – спокойная геомагнитная обстановка.

«Космическая» погода 16 июня 1983 года. В этот период времени незначительное возмущение магнитного поля было 9 июня (индекс геомагнитной активности K_p изменялся в пределах 2–5 единиц, а индекс $A_p = 19$), 10 июня с 12^h UT до 18^h UT наблюдалась магнитная буря ($K_p = 6+$, $A_p = 37$). Затем 12 июня наступил период спокойной геомагнитной обстановки (K_p – индекс от 2 до 4–, $A_p = 16$). Индекс авроральной активности AE не превышал 550 нТл (за исключением 10 июня, где AE доходил до 1200 нТл). Индекс D_{st} -вариаций геомагнитного поля в эти дни измерялся в пределах от 35 до –55 нТл. Поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см $F_{10.7}$ изменялся от 130 до 160 единиц за отмеченный период. Скорость солнечного ветра V_{SW} в рассматриваемый период достигала значений 360–450 км/с, температура T частиц – $(0,9–2,3) \cdot 10^5$ К, их концентрация варьировалась в пределах $(22–41) \cdot 10^6$ м^{–3}, давление солнечного ветра p_{SW} не превышало 11,8 нПа. Таким образом, для второго рассматриваемого солнечного затмения геомагнитная обстановка была более спокойной, чем для первого.

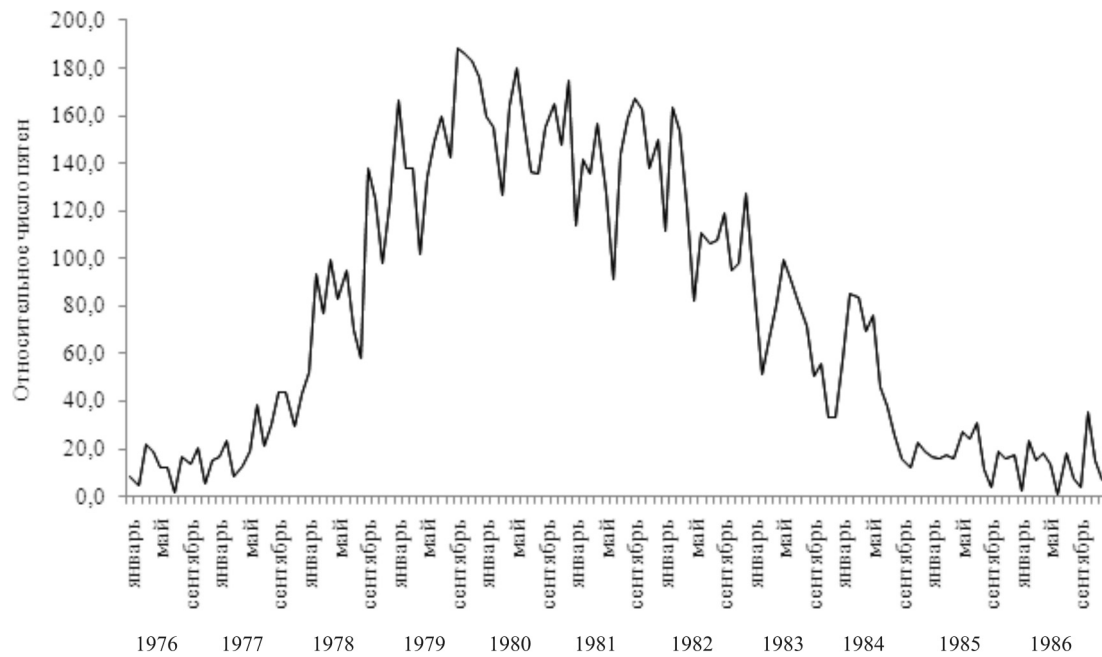


Рис. 3. Относительное число солнечных пятен в 21 солнечном цикле

2. Изменение эффективной высоты отражения

В работах [9, 10] отмечается, что при прохождении полосы лунной тени вдоль трассы распространения сигналов не происходит изменения амплитуды принимаемого сигнала. Поэтому в работе [10] говорится о необходимости свести влияние затмения к изменению геометрических размеров волновода Земля – ионосфера, а не импеданса его стенок. Поэтому в качестве такого параметра вводится h – эффективная высота волновода, который определяется как уровень постоянной концентрации электронов вдоль трассы распространения.

Электронная концентрация слоя изменяется в зависимости от линейной фазы затмения: $N_m = N_m(\Phi)$ (Φ – отношение закрытой части диаметра Солнца к полному), в результате чего любому фиксированному значению $N(h) = N_0$ соответствуют различные высоты h [10]. Аппроксимируя профиль электронной концентрации в нижней ионосфере экспонентой, выбираем в качестве N_0 значение электронной концентрации на высоте дневного волновода $h_0 = 64$ км, определим изменение эффективной высоты отражения волновода $h_{эфф}$ как функцию Φ . В предположении, что излучение по диску Солнца и его короне распределено равномерно, изменение высоты слоя $\Delta h = h_{эфф} - h_0$ можно представить в виде

$$\Delta h = H \ln \frac{I(\Phi)}{I(0)}, \quad (1)$$

где $I(\Phi)$ – поток излучения, зависящий от фазы затмения; $I(0)$ – полный поток в дневное время.

Согласно [10], изменению эффективной высоты Солнца во время солнечного затмения можно рассчитать по формуле

$$\Delta h = H \ln \left[\frac{I_n}{I_{\partial n}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_{\odot}} \right) + \frac{I_0}{I_{\partial n}} \left(1 - \frac{S(\Phi)}{S_{\odot}} \right) + \frac{S(\Phi)}{S_{\odot}} \right], \quad (2)$$

где I_n – ионизирующее излучение, действующее в ночное время; I_0 – поток от солнечной короны; $S(\Phi)$ – площадь открытой части Солнца; $S_{\odot}$ – полная площадь солнечного диска. При расчете изменения высоты по формуле (2) значения величин были выбраны: $H = 6,5$ км, $I_n / I_{\partial n} = 0,01$, $I_0 / I_{\partial n} = 0,1$ [11]. Отношение открытой площади Солнца к полной во время солнечного затмения выразили через линейную фазу затмения [11].

С помощью бесселевых элементов затмения по методике, изложенной в [11], были рассчитаны распределение фаз затмения вдоль трасс распространения в интересующие моменты времени. Для этого предварительно разбивались трассы на промежуточные точки через 100 км, рассчитывались их координаты. Затем по графику из работы [12] определяем эффективную высоту отражения.

3. Вариации фазы на трассах во время солнечного затмения

Согласно [13], характер зависимости фазовой скорости от частоты определяется преиму-

щественно геометрическими характеристиками волноводного канала (высотой и кривизной), а электрические характеристики его стенок играют значительно меньшую роль. Необходимо также отметить, что многомодовый характер распространения в СДВ-диапазоне приводит к тому, что поле с расстоянием и частотой изменяется нерегулярно. При расстояниях больше 3000 км одномодовое распространение имеет место только для частот ниже 14 кГц (на этих частотах доминирующей является первая мода).

При одномодовом распространении на трассе фаза поля линейно изменяется с расстоянием [13]:

$$\varphi = \beta r. \quad (3)$$

Тогда параметр β_m , определяющий приращение аргумента функции ослабления отдельной моды при изменении расстояния на 1000 км [13]:

$$\beta_m \left[\frac{\text{рад}}{1000 \text{ км}} \right] \cong 2,095 \cdot 10^{-2} f \left(1 - \frac{v_1}{c} \right), \quad (4)$$

где f – частота в герцах; v_1 – фазовая скорость первой моды.

В случае трасс переменной высоты волновода Земля – ионосфера фазовая скорость вдоль трассы распространения не остается постоянной. При плавном изменении высоты волновода в случае полного солнечного затмения определить значение φ_z можно по формуле

$$\varphi_z = \int_0^r \beta(r) dr. \quad (5)$$

Приближенная формула для расчета фазовой скорости в случае одномодового распространения [13]:

$$\frac{v_1}{c} - 1 \cong \frac{\pi^2}{8k^2 h^2} - \frac{h}{2a} \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \right), \quad (6)$$

где $a = 6370$ км – радиус Земли; $k = \omega / c$ – волновое число в вакууме; $c = 299792,5$ км/с – скорость света в вакууме; ω – циклическая частота.

Таким образом, в соответствии с профилем трасс с использованием линейной интерполяции находятся значения фазовой скорости и вычисляется фаза сигнала для различных моментов времени.

4. Сравнение расчетных и экспериментальных вариаций фазы

Изменения фазы $\Delta\varphi$ определяются относительно невозмущенного значения фазы φ_0 ($\Delta\varphi = \varphi_z - \varphi_0$). Распространение сигналов в условиях полного солнечного затмения можно считать одномодовым, так как при небольшой его продолжительности ночные условия распространения не успевают сформироваться.

Здесь же необходимо отметить, что средне-квадратическое отклонение фазы принимаемого сигнала для трассы Австралия – Хабаровск (частота 10,2 кГц и 11,05 кГц) при невозмущенных условиях, соответствующих дневным условиям распространения, составляет 2–3 сантицикла, а для трассы Ля Реюньон – Хабаровск (частота 13,6 кГц) – не более 5–6 сантициклов. Как видно из рис. 4, характер изменения фазы принимаемого сигнала совпадает с расчетным, однако относительная погрешность составляет 67 % для трассы Ля Реюньон – Хабаровск, для трассы Австралия – Хабаровск значения относительной погрешности следующие: частота 10,2 кГц – 41 %, частота 13,6 кГц – 35 %. В работах [10, 12] говорится о более точном совпадении расчетной величины фазы с экспериментальной. Так, на частоте 16 кГц погрешность составляет меньше 10 %, на частоте 60 кГц расхождение несколько больше (порядка 33 %). Эти данные приведены также для солнечного затмения 31 июля 1981 года по приемам сигналов двух радиостанций в г. Харькове относительно высокостабильного опорного генератора. В работе [10] по данной методике приводятся ожидаемые вариации фазы для двух частных затмений и одного полного затмения. Здесь отмечено, что лучшие результаты получены для затмений, происходящих на дневных трассах, но даже если эти условия не выполняются (на трассе переходный период ночь – день или наоборот), относительная погрешность не превышает 20 %.

Однако необходимо отметить, что условия данной работы отличаются от вышеперечисленных. Здесь рассматривается полное солнечное затмение и анализируются другие принимаемые частоты (10,2 кГц и 13,6 кГц).

Были вычислены коэффициенты линейной корреляции между отклонением фазы принимаемого сигнала и расчетной фазой. Они составляют следующие значения: Ля Реюньон – Ха-

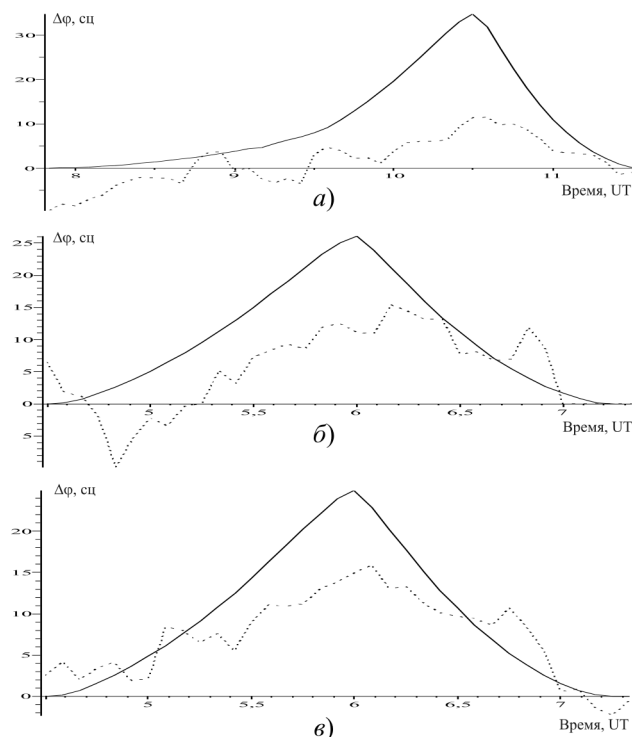


Рис. 4. Сравнение расчетных (сплошная линия) и экспериментальных (пунктирная линия) значений фазы сигнала: а) трасса распространения РНС «Омега» (Ля Реюньон) – Хабаровск, частота 13.6 кГц, день затмения 16.02.80; б) трасса распространения РНС «Омега» (Австралия) – Хабаровск, частота 10.2 кГц, день затмения 11.06.83; в) трасса распространения РНС «Омега» (Австралия) – Хабаровск, частота 11.05 кГц, день затмения 11.06.83

баровск (частота 13,6 кГц) – 0,8266, а для трассы Австралия – Хабаровск: как для частоты 10.2 кГц, так и для частоты 11.05 кГц – 0,7080. Это можно было предположить из характера изменения обеих функций (рис. 4).

Из рис. 4 также очевидно, что расхождение между максимумами фазы принимаемого сигнала и рассчитанного составляет порядка 10 минут. В работе [6] также отмечается, что разность между временем максимального значения отклонения фазы принимаемого сигнала и максимумом фазы смоделированного сигнала колеблется в диапазоне 6–16 минут. Максимум эффекта наблюдался, когда лунная тень затеняла наибольший участок трассы распространения сигнала.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить влияние Солнца на нижнюю ионосферу. Эту оценку можно провести как во время полного солнечного затмения, так и для суточного хода изменения фазы принимаемого сигнала. Для уменьшения относительной погрешности необходимо учитывать дополнительные эффекты, которые приводят к изменению эффективной высоты отражения. Например,

это может зависеть от эффективной высоты отражения волновода Земля – ионосфера от зенитного угла Солнца.

Список литературы

1. Нестеров В.И. Основные направления исследования распространения радиоволн СДВ-диапазона в Дальневосточном регионе // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12. № 1. С. 91–98.
2. Нестеров В.И. Экспериментальное исследование сигналов СДВ-диапазона во время солнечного затмения 31 июля 1981 года // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 12. № 1. С. 11–15.
3. Нестеров В.И., Олифиренко Н.А., Петлеванный А.Н. Погрешность сличения эталонов при использовании сигналов РНС «Омега» // Измерительная техника. 1985. № 1. С. 34–35.
4. Нестеров В.И., Щавелев А.И., Апрышкин Г.Д. Особенности СДВ радиоканала синхронизации при трансэкваториальном распространении // Измерительная техника. 1987. № 10. С. 27–29.
5. Пудовкин М.И. Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 10. С. 106–113.
6. Solar-Geophysical Data, part I. Boulder, Colo, USA.
7. Григоренко Е.И., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. 48. № 3. С. 350–364.
8. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html/>.
9. Солнечное затмение 31 июля 1981 г. и вариации характеристик распространения ДВ- и СДВ-радиосигналов на коротких трассах / В.А. Живулин [и др.] // XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн. Тез. докл. Ч. I. М.: Наука, 1984. С. 298–299.
10. Моиссенко Л.Н., Шубова Р.С. Изменение эффективной высоты ионосферы в период солнечного затмения // Известия вузов. Радиофизика. 1978. Т. XXI. № 2. С. 269–274.
11. Михайлов А.А. Солнечное затмение 31 июля 1981 г. и его наблюдения / под ред. акад. А.А. Михайлова. М.: Наука, 1980. 160 с.
12. Рубинштейн И.И., Сопельников М.Д., Шубова Р.С. Вариации фазы СДВ- и ДВ-полей во время солнечного затмения 31 июля 1981 г. // Известия вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 9. С. 1171–1173.
13. Орлов А.Б., Азарнин Г.В. Основные закономерности распространения сигналов СДВ-диапазона в волноводном канале Земля – ионосфера // Проблемы дифракции и распространения волн: сб. ст. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. Вып. X. С. 3–107.

Determination of parameters of signals VLF-range during a solar eclipse

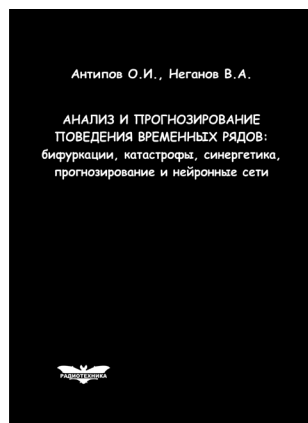
V.I. Nesterov

The investigation results of radio waves propagation of VLF range during solar eclipse. Data are presented for paths of different lengths. Provides a method of calculating the effective height of ionospheric reflection as a function of solar phase of the Eclipse of the Sun. Shows the changes signal phase for two total solar eclipses.

Keywords: myriametric band, phase of the received signal, phase of the eclipse Sun, terminator.

Антипов, О.И.

Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с. ISBN 978-5-88070-294-7



УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроффрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.