

УДК 621.371.242.7

**СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ 16 И 60 кГц,
РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ПО ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ ТРАССЕ**

Н. А. Князева, Р. С. Шубова

Обнаружено сходство в изменении параметров сигналов на частотах 16 и 60 кГц при распространении их по одной и той же трассе, в частности одновременность восходящих и заходящих изменений на обеих частотах. Выполнены расчеты, которые показали, что на частоте 60 кГц поле хорошо описывается суммой небольшого числа нормальных волн, но более высоких номеров, чем на 16 кГц.

Многолетние данные, регулярно получаемые службой времени и частоты при приеме сигналов эталонных частот, наряду со своим непосредственным назначением для сличения шкал времени и контроля эталонов можно использовать также для целей диагностики среды, в которой происходит их распространение. Харьковская служба времени и частоты выполняет измерения в широком диапазоне частот, в том числе на 16 и 60 кГц. Эталонные сигналы на частотах 16 и 60 кГц распространяются по одной и той же трассе Рагби — Харьков протяженностью 2600 км. Использование данных двухчастотных измерений значительно расширяет возможности и позволяет повысить достоверность оценок при решении обратных задач. Основная проблема, с которой приходится в этом случае столкнуться, состоит в выборе модели, адекватно описывающей условия распространения на каждой из частот.

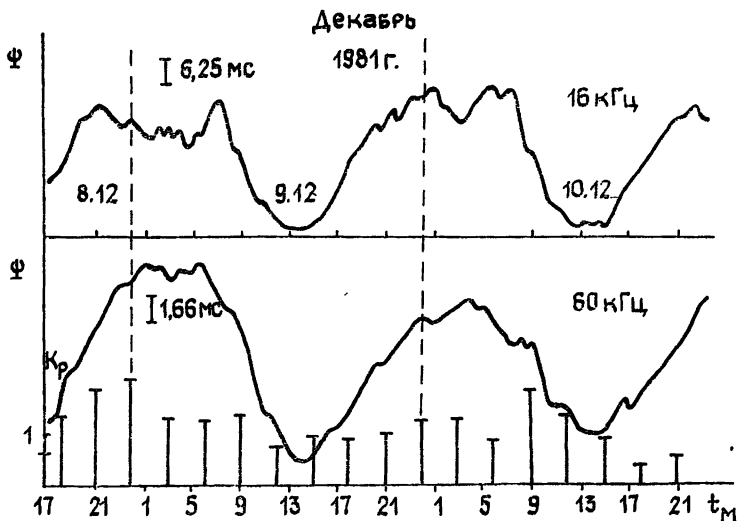


Рис. 1.

Как известно, сверхдлинные волны распространяются в естественном волноводе, образованном поверхностью Земли и нижней границей ионосферы. Теория волноводного распространения СДВ на основе метода нормальных волн хорошо разработана, например, в работах [1-3] для диапазона частот 5—30 кГц. При этом на расстояниях свыше

2000 км и частотах до 20 кГц поле с достаточной точностью может быть рассчитано с помощью ограниченного числа мод: в дневное время — одна мода, ночью — 2—3 моды [4]. Между теоретическими расчетами и экспериментальными данными, полученными на трассе Рагби — Харьков, имеется хорошее соответствие.

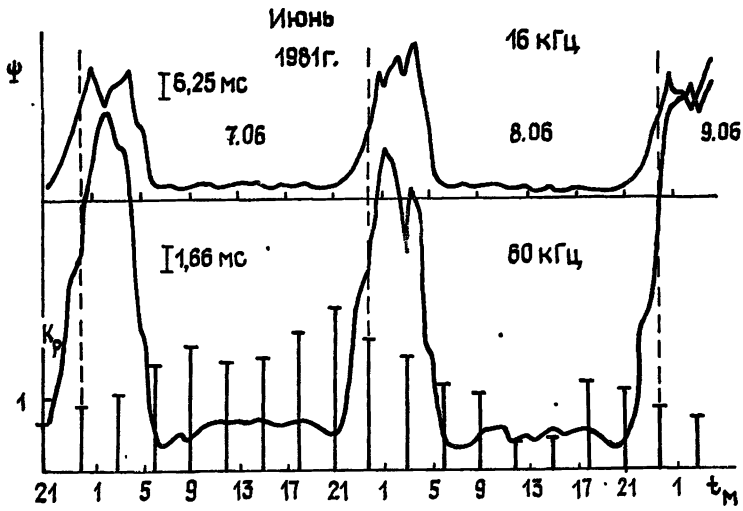


Рис. 2.

Сравнение результатов измерений амплитудно-фазовых характеристик сигналов на частоте 60 кГц с данными, одновременно полученными на частоте 16 кГц, выявляет между ними много общего, что наводит на мысль о возможности единообразного их описания. В качестве примера на рис. 1, 2 приведены суточные изменения фазы сигналов на частотах 16 и 60 кГц, измеренные в Харькове, относительно высокостабильного генератора ($\Delta f/f \sim 10^{-13}$) в разное время года. На рис. 3 кроме суточных изменений фазы сигнала показан также суточный ход амплитуды на каждой из частот.

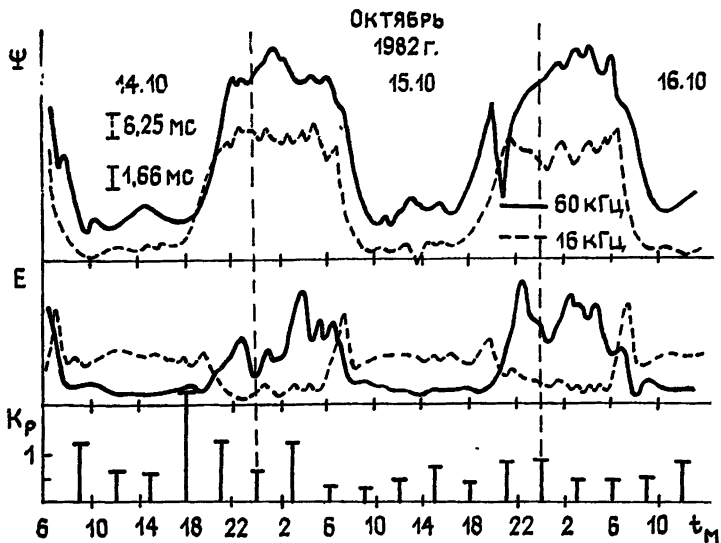


Рис. 3.

Прежде всего, приведенные графики обращают на себя внимание одновременностью восходящих и заходящих изменений фазы и амплитуды сигналов на обеих частотах. Изменения параметров сигналов начинаются при подходе терминатора к приемному пункту и заканчиваются

при его прохождении над передатчиком. Это дает основание предположить, что на 60 кГц, так же как и на 16 кГц, вся область ионосферы между передатчиком и приемником участвует в формировании характеристик сигнала. Суточные изменения фазы на 16 и 60 кГц идентичны и имеют вид трапеции. Летом фаза сигналов на обеих частотах от момента восхода Солнца у передатчика до захода у приемника сохраняется на неизменном уровне. Так же устойчиво ведет себя дневная фаза в весенний и осенний периоды, и только зимой в отдельные дни наблюдаются изменения, которые можно объяснить зависимостью высоты волновода от зенитного угла Солнца, причем происходит это как на частоте 16 кГц, так и на 60 кГц. В отличие от частоты 16 кГц на частоте 60 кГц большие изменения претерпевает суточный ход фазы как от суток к суткам (см., например, рис. 4), так особенно от одного сезона к другому. Летом на частоте 60 кГц высота фазовой трапеции $\sim 500^\circ$, а зимой $200^\circ - 300^\circ$. Перестройка суточного изменения фазы от летних значений к зимним происходит в конце сентября — начале октября. В этот же период в отдельные сутки наблюдаются скачкообразные изменения фазы интерференционного характера (см., например, рис. 3). Амплитуда сигнала на частоте 60 кГц ночью в несколько раз больше, чем днем. На частоте 16 кГц амплитуда сигнала на этой трассе в ночное время в 2—10 раз меньше дневной, что, как известно, связано с нахождением приемного пункта в окрестности интерференционного минимума поля (нулевой и первой моды) [4, 5].

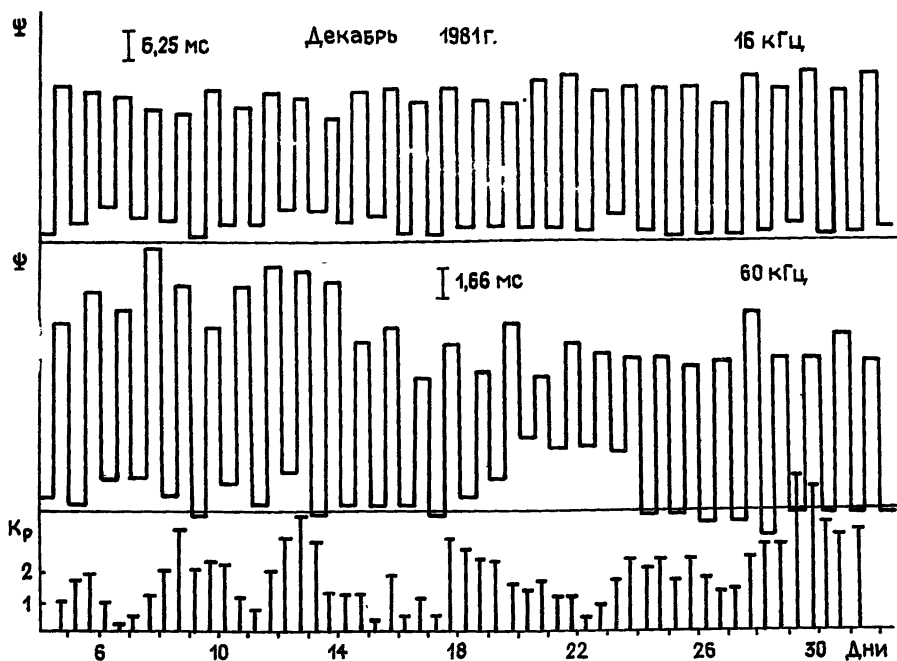


Рис. 4.

Все указанные выше особенности в характере суточных изменений параметров сигналов на разных частотах позволяют предположить, что модовое представление окажется пригодным для описания поля на частоте 60 кГц. При этом, так же как и на 16 кГц, основную роль в формировании поля будет играть небольшое число нормальных волн.

В [6] при анализе полей на частотах 50 — 150 кГц было использовано модовое представление. Выполненные расчеты показали, что с ростом частоты ведущая роль переходит к модам более высоких номеров, но при этом практически сохраняется число нормальных волн со сравнимыми амплитудами, вносящими основной вклад в поле. На частоте 60 кГц при высоте волновода около 70 км (для которой выполнен

Таблица 1

Параметры	Номер моды							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	День							
E_i	$14 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$18,8 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$				
φ_i (рад)	19,6	10,8	4,8	-7,2				
λ_i (рад)	0,35	1,55	1,2	0,73				
φ'_i (рад)	19,95	12,35	6	-6,47				
	Ночь							
Параметры								
E_i		10^{-7}	10^{-4}	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$14,2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$
φ_i (рад)		34,6	23,9	14,4	5,6	-4,9	-22,3	-37,2
λ_i (рад)		0,69	1,24	2,2	3,8	0,58	0,54	0,61
φ'_i (рад)		35,29	25,14	16,6	9,34	-4,32	-21,8	-36,6

Таблица 2

Параметры	Номер моды								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	День								
E_t	$3,4$ 10^{-4}	32 10^{-2}	16 10^{-2}	$1 \cdot 10^{-2}$	$2,5$ 10^{-4}				
φ_t (рад)	20,25	9,93	1,77	-13,5	-34,4				
λ_t (рад)	2,5	0,72	0,9	0,78	0,72				
φ'_t (рад)	22,75	10,65	2,67	-12,72	-33,6				
	Ночь								
Параметры									
E_t	$7,6$ 10^{-8}	$1,1$ 10^{-4}	$1,4$ 10^{-2}	59 10^{-2}	25 10^{-2}	$8,6$ 10^{-2}	$1,3$ 10^{-2}	1 10^{-2}	
φ_t (рад)	35	24	14,7	3,2	-7,5	-22,5	-53	-75	
λ_t (рад)	0,44	0,63	0,89	0,87	0,72	0,72	3,35	4	
φ'_t (рад)	35,4	24,6	15,6	4,07	-6,8	-21,8	-49,6	-71	

расчет) на расстоянии более 2000 км число мод со сравнимыми амплитудами, несущими основной вклад в результирующее поле, две-три, но в отличие от результатов для частоты 16 кГц это не низшие моды, а более высоких номеров.

Аналогичные расчеты для разных высот ионосферы (дневные и ночные условия) на исследуемой трассе были выполнены нами на частоте 60 кГц. Для расчетов амплитуд и фаз отдельных нормальных волн были использованы значения постоянных распространения, полученных в ЛГУ при активном содействии С. Т. Рыбачек. Постоянные распространения рассчитаны для 10 мод. Расчеты выполнены с учетом влияния магнитного поля Земли для двух профилей электронной концентрации, применяемых при расчетах в СДВ диапазоне, отличающихся значением производной электронной концентрации по высоте [3, 7, 8]. В табл. 1 и 2 приведены результаты расчета для обоих случаев (E_i — амплитуда моды, φ_i — аргумент функции ослабления моды, λ_i — аргумент коэффициента возбуждения моды, $\varphi'_i = (\varphi_i + \lambda_i)$ — фаза моды).

Видно, что при переходе от дня к ночи происходит смена ведущей моды. Так, в соответствии с табл. 1 днем ведущей оказывается первая мода, ночью — четвертая и пятая моды. Фазовые скорости нормальных волн с преобладающей амплитудой наиболее близки к скорости света. Причем фазовая скорость четвертой моды меньше, а пятой — больше скорости света. Это приводит к тому, что в ночном волноводе поле носит интерференционный характер. Шестую моду, хотя уровень ее амплитуды всего примерно в три раза меньше пятой, можно, по-видимому, не учитывать при расчете средних полей. Основанием для этого можно считать то обстоятельство, что отличие фазовой скорости шестой моды от скорости света в 3—5 раз превосходит соответствующую характеристику пятой моды, и поэтому она (шестая мода) становится существенно более неустойчивой к малым изменениям параметров модели. Присутствие как высших, так и низших мод с меньшими, чем у ведущих мод, амплитудами и большими отличиями фазовой скорости от скорости света, по-видимому, является причиной больших, чем на 16 кГц, вариаций фазы и амплитуды сигнала на 60 кГц как от суток к суткам, так и при смене времен года. Амплитуда сигнала ночью в соответствии с данными табл. 1 в 4,5 раза больше, чем днем, что неплохо согласуется с экспериментальными результатами.

Смена ведущих мод с ростом частоты происходит вследствие фильтрации низших мод из-за ухудшения условий их возбуждения. Уменьшение уровня нормальных волн высоких номеров обусловлено ростом затухания.

В заключение выполнены некоторые статистические оценки. На рис. 4 приведены усредненные дневные и ночные уровни фазы на частотах 16 и 60 кГц за декабрь 1981 г. (верхние горизонтальные линии соответствуют усредненным дневным, а нижние — дневным значениям фазы).

Усреднение выполнено в пределах каждых суток по дневным реализациям длительностью 4 часа и ночным — 8 часов. На нижнем графике показаны средние дневные и ночные значения K_p -индексов. С учетом этих данных определены стандартные отклонения высоты фазовой трапеции $\sigma_{\Delta\varphi}$, а также дневных $\sigma_{\Delta\varphi_{\text{дн}}}$ и ночных $\sigma_{\Delta\varphi_{\text{н}}}$ изменений фазы относительно их средних значений (усреднение выполнялось по всем реализациям декабря 1981 г.). Оценки, полученные с погрешностью не более 20%, приведены в табл. 3.

Кроме этих оценок были рассчитаны также коэффициенты корреляции. Между вариациями высоты фазовой трапеции на частотах 16 и 60 кГц корреляция оказалась низкой ($K_{f,f}^{\Delta\varphi} = -0,24$). Более высокое

Таблица 3

$\sigma, \text{ мс}$	f	
	16 кГц	60 кГц
$\sigma_{\Delta\varphi}$	3,5 (21°)	2,2 (42°)
$\sigma_{\Delta\varphi_{\text{дн}}}$	1,8 (11°)	1,3 (27°)
$\sigma_{\Delta\varphi_{\text{н}}}$	2,8 (14°)	2,15 (41°)

значение корреляций получается между дневными вариациями фазы ($K_{f_1, f_2}^{\phi_{дн}} = 0,39$). Корреляция суточных изменений фазы обеих частот с геомагнитной активностью отсутствует. Как было показано в [9], на частоте 16 кГц это обусловлено сложной модовой структурой сигнала, по-видимому, та же причина на частоте 60 кГц, и ею же объясняется низкое значение корреляции вариаций высот фазовой трапеции на 16 и 60 кГц.

Авторы благодарят П. В. Блюха и А. А. Ткачука за внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснушкин П. Е., Яблочкин Н. А. Теория распространения сверхдлинных волн. Второе стереотипное издание. — М.: ВЦ АН СССР, 1963. — 93 с.
2. Макаров Г. И., Новиков В. В., Орлов А. Б. — Изв. вузов — Радиофизика, 1970, 13, № 3, с. 321.
3. Wait J. R., Spies K. P. — NBS Tech Not, 1964, № 300, 24 p.
4. Краснушкин П. Е., Федоров Е. Н., Сопельников М. Д. — Геомагнетизм и аэрономия, 1971, 11, № 6, с. 997.
5. Безродный В. Г., Блюх П. В., Шубова Р. С., Шульга В. Ф., Ямпольский Ю. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1974, 17, № 1, с. 1671.
6. Galejs J. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves. — Oxford: Pergamon Press, 1972. — 362 p.
7. Орлов А. Б., Уваров А. Н. В кн.: Проблемы дифракции и распространения волн. — Л., 1974, вып. 14, с. 96.
8. Орлов А. Б., Уваров А. Н. В кн.: Проблемы дифракции и распространения волн. — Л., 1977, вып. 15, с. 83.
9. Безродный В. Г., Шубова Р. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 9, с. 1237.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
23 июля 1985 г.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF 16 kHz AND 60 kHz VLF RADIO SIGNALS PROPAGATING ALONG THE SAME PATH

N. A. Knyazeva, R. S. Shubova

Diurnal variations of signal parameters at 16 and 60 kHz are analysed for the same propagation path. The two signals have much in common. A particularly interesting feature is the simultaneous occurrence of variations at sunrise and sunset. The calculations performed show that at 60 kHz the wave field can be represented by a small number of modes but of a higher order than at 16 kHz.
