

УДК 621.391.83

АНТИПОДНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В. Ф. Брянцев

ОАО «НПП «Полёт», г. Нижний Новгород, Россия

Рассматриваются особенности антиподного распространения радиоволн декаметрового диапазона по материалам измерений на дальних радиотрассах. Измерения проводились на частотах 10 и 15 МГц на борту научно-исследовательского судна при пересечении им антиподной области станции единого времени РИД, расположенной вблизи г. Иркутск. Обсуждается наблюдаемое уменьшение диапазона многолучёвости, возрастание уровня принимаемых сигналов в районе антиподной точки, а также особенности суточного хода их амплитуды.

Об антиподном распространении декаметровых радиоволн в настоящее время известно сравнительно немного. Измерения в антиподных областях¹ достаточно трудоёмки, т. к. они часто расположены в труднодоступной местности. Это одна из причин того, что большинство измерений в антиподных областях проводилось с использованием передатчиков, расположенных на борту искусственных спутников Земли при прохождении ими этих областей. Подробно эти измерения, как и относительно малочисленные измерения на радиотрассах «земля—земля», рассматриваются в [1–6]. Как правило, антиподное распространение рассматривается как экзотический и малоприменимый для практического применения способ распространения радиоволн, когда при увеличении длины трассы до 10^4 км в среднем может наблюдаться увеличение уровня принимаемого сигнала за счёт уменьшения размеров фронта волны, распространяющейся между Землёй и ионосферой. Наиболее отчётливо этот эффект проявляется в сверхдлинноволновом диапазоне [3, 4], где он наблюдается постоянно. Считается, что в декаметровом диапазоне этот эффект наблюдается эпизодически, о чём говорят результаты проведённых измерений [1, 2, 5, 6]. Причин несколько: во-первых, напряжённость поля сигнала неравномерно распределена по высоте, и антиподную область на Земле сигнал может «перепрыгивать», распространяясь по скачковым, рикошетирующим или скользящим траекториям; во-вторых, существует зависимость уровня принимаемого сигнала от времени суток и азимута приёма, сходная с вращением оптимальных азимутов при приёме кругосветных сигналов [1]. Поэтому сравнение результатов измерений в антиподной и произвольно выбранной точках на поверхности Земли неправомочно, поскольку в антиподную точку сигнал может приходиться по другой радиотрассе. Уверенно обнаружить эффект увеличения поля в антиподной точке достаточно сложно, для этого необходима организация нескольких пунктов приёма на разных радиотрассах. Нами была сделана попытка исследования этого эффекта на борту судна при его движении вдоль среднеширотной трассы распространения сигнала. Угол наклона плоскости трассы к плоскости экватора почти не менялся и был близок к минимальному возможному, равному широте точки излучения.

Нас интересовало изменение диапазона многолучёвости по мере приближения к антиподной точке и изменение амплитуды принимаемых сигналов. На практике для борьбы с многолучёвостью используются специальные модемы, позволяющие компенсировать её влияние в ограниченном диапазоне задержек (примерно 5 мс). Этой величины обычно достаточно для радиосвязи на радиотрассах с протяжённостью менее 4÷6 тыс. км. Если диапазон многолучёвости больше

¹ Обычно под антиподной областью (точкой) понимается наиболее удалённая область (точка) земной поверхности, лежащая на прямой, проходящей через исходную точку и центр Земли.

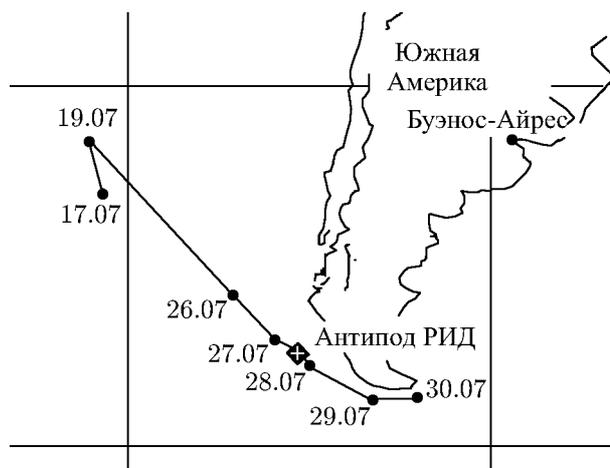


Рис. 1

этой величины, приходится снижать скорость передачи данных. Исследование характеристик антиподного распространения было проведено в 1980 году на борту научно-исследовательского судна «Кегостров». Измерения проводились в Атлантическом и Тихом океанах при пересечении судном антиподной области станции единого времени РИД, расположенной вблизи г. Иркутск. Маршрут судна и местоположение антиподной точки во время этих измерений показаны на рис. 1. Судно, на борту которого проводились измерения, двигалось вдоль среднеширотной трассы Иркутск—антиподная точка Иркутска в период с 19 по 29 июля 1980 года.

Антиподная область была пройдена 27–28 июля 1980 года. На борту проводился круглосуточный приём сигналов станций единого времени РИД (г. Иркутск) и РВМ (г. Москва) на частотах 10 и 15 МГц в период с 17 по 30 июля 1980 года. При этом длина радиотрассы Иркутск—судно менялась от $1,75 \cdot 10^4$ км (19.07.1980) до $2,0 \cdot 10^4$ км (28.07.1980). Движение проходило вдоль среднеширотной радиотрассы Иркутск—антиподная точка Иркутска с почти неизменным углом наклона трассы к плоскости экватора $\delta = 64,5^\circ \div 69,3^\circ$. В качестве контрольного проводился приём на радиотрассе Москва—судно с протяжённостью около $1,55 \cdot 10^4$ км и углом $\delta = 55,8^\circ \div 61,3^\circ$. Контрольный приём проводился для обнаружения эффектов солнечных вспышек, которые могли одновременно проявляться на обеих трассах.

Для измерений использовался приёмоизмерительный комплекс «Невод-200» [7], позволявший одновременно на четырёх частотах измерять уровень сигнала в зависимости от времени распространения. Регистрировались осциллограммы принимаемых сигналов, полученные в режиме накопления за время около 50 с с разрешением по времени распространения 1 мс. Это позволяло сглаживать быстрые флуктуации принимаемых сигналов и измерять их среднюю амплитуду в зависимости от времени распространения с точностью около 10%. Режим накопления позволял не только обнаруживать слабые сигналы, но, что часто оказывалось более существенным, увеличивать точность измерений их среднего уровня.

Время распространения сигналов измерялось с использованием местной шкалы времени, которая синхронизовалась с мировой при выходе судна в рейс по сигналам точного времени, получаемым из Центра единого времени по телевизионному каналу. Время распространения сигнала от Центра единого времени до г. Ленинград, откуда выходило судно, было измерено и учитывалось. Точность привязки судовой шкалы времени к мировому времени была не хуже ± 2 мкс. Во время рейса шкала времени хранилась системой хранения времени, состоящей из квантового стандарта частоты Ч1-50 и блока хранения секунды, выполненного с тройным резервированием элементов и аварийным питанием, переход на которое осуществлялся автоматически при аварийном пропадании напряжения сети. При возвращении судна было проведено измерение ухода шкалы времени за время рейса (около 20 мс за девять месяцев), которое в дальнейшем учитывалось при обработке результатов измерений.

Исследования [8–11] показали, что на радиотрассах декаметрового диапазона с протяжённостью $(3 \div 20) \cdot 10^3$ км наиболее часто наблюдаются несколько основных типов распространения

радиоволн: распространение вдоль короткой дуги большого круга, связывающей передатчик и приёмник, включая все моды распространения с отражением от ионосферы (прямой сигнал); распространение вдоль длинной дуги большого круга (сигнал обратного эха) и распространение с использованием пассивного ретранслятора, в роли которого выступают ионосферные неоднородности экваториальной зоны (экваториальный боковой сигнал) или неоднородности земной поверхности (сигналы, рассеянные Землёй) [8, 9].

Установлена регулярность и предсказуемость появления этих типов сигналов, а также наличие суточного хода их основных параметров [10, 11], вследствие чего в разное время суток и на разных частотах наиболее интенсивными оказываются разные сигналы. Разное время распространения и разные направления прихода позволяют различить и разделить сигналы.

В антиподной области, которую судно проходило 27–28 июля 1980 года, разделение по времени распространения практически отсутствовало — в течение полных суток принимался один слабо искажённый по форме сигнал. Суточные изменения его времени распространения не превышали $2 \div 3$ мс. Амплитуда сигнала в зависимости от времени суток менялась в диапазоне $40 \div 60$ дБ.

На рис. 2 приведены несколько осциллограмм (зависимостей амплитуды A от времени задержки τ) вне антиподной области (панели $a, в, д, жс$) и внутри неё (панели $б, г, е, з$), точками обозначены измерения на частоте 10 МГц, крестиками — на частоте 15 МГц. Ширина временного канала в измерениях 1,5 мс, время усреднения — 48 с, число реализаций при накоплении — 240.

Измерения вне антиподной области проведены 11.07.1980 на трассе с протяжённостью $1,74 \cdot 10^4$ км с углом наклона трассы к плоскости экватора $59,7^\circ$, измерения в антиподной области проведены 28.07.1980.

Принимались сигналы станции единого времени РИД (Иркутск) импульсами с длительностью 20 мс с частотой следования 10 Гц. Измерения проводились круглосуточно, четыре раза в час. На рис. 2 приведены наиболее характерные осциллограммы, демонстрирующие суточные изменения принимавшихся сигналов. Из рисунка видно, что вне антиподной области попеременно наблюдались прямые сигналы (рис. 2в, д) и сигналы обратного эха (рис. 2а, д, жс). Кроме них, на рис. 2жс отмечен рассеянный сигнал с временем распространения несколько большим, чем у прямого сигнала. В антиподной точке (рис. 2б, г, е, з) наблюдались только сигналы, время распространения которых соответствует прямым сигналам. Другие типы сигналов, как и предполагалось, отсутствовали, т. к. в антиподную область можно попасть только по «прямым» трассам. В течение суток эти трассы менялись — наиболее выгодными оказывались трассы с минимальными энергетическими потерями, которые изменяются в зависимости от времени суток.

Суточный ход усреднённой амплитуды принимаемого сигнала во время измерений при прохождении области вблизи антиподной точки приведён на рис. 3, точками обозначены измерения на частоте 10 МГц, крестиками — на частоте 15 МГц. Приведены графики суточного хода с 8 до 24 часов. С 0 до 8 часов измерения также проводились, но в эти часы уровень сигнала был очень низким. Наибольшие амплитуды регистрировались 27 и 28 июля, когда судно проходило антиподную область, двигаясь по среднеширотной трассе с углом наклона $\delta \approx 66^\circ$. В эти дни сигнал на частоте 15 МГц принимался практически круглосуточно, а его амплитуда, в зависимости от времени суток, менялась в диапазоне $1 \div 220$ мкВ на входе приёмника. Максимальные амплитуды принимаемого сигнала регистрировались в интервале 16–17 MSK, когда передатчик и приёмник находились вблизи линии терминатора. Диапазон многолучёвости вблизи антиподной точки не превышал $2 \div 3$ мс, в то время как на трассах с меньшей протяжённостью он достигал нескольких десятков миллисекунд. При этом амплитуда задержанных сигналов могла многократно превышать амплитуду сигналов, пришедших по короткой трассе, или даже приниматься в их отсутствие.

Увеличение диапазона многолучёвости вдали от антиподной точки связано с тем, что её при-

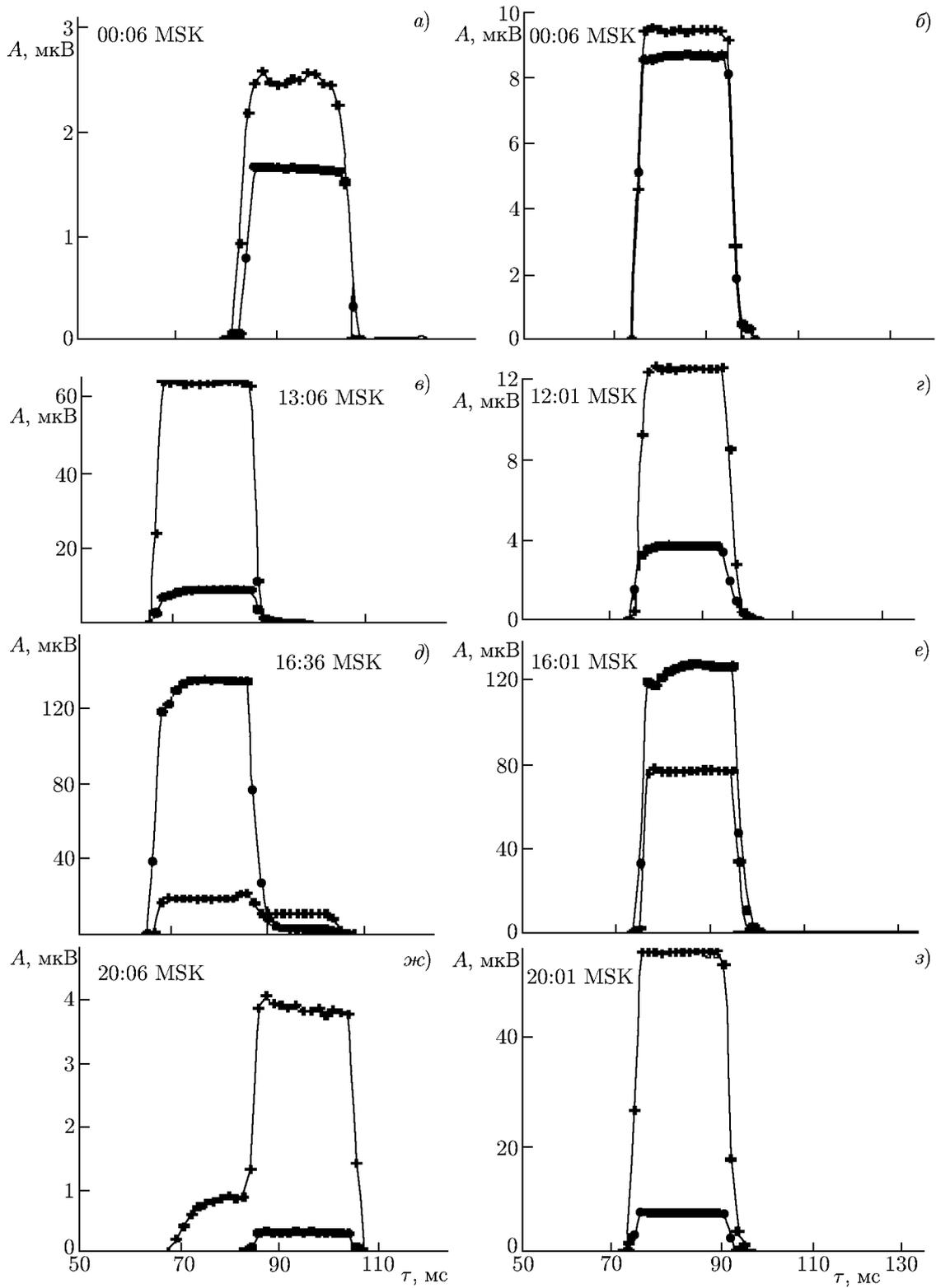


Рис. 2

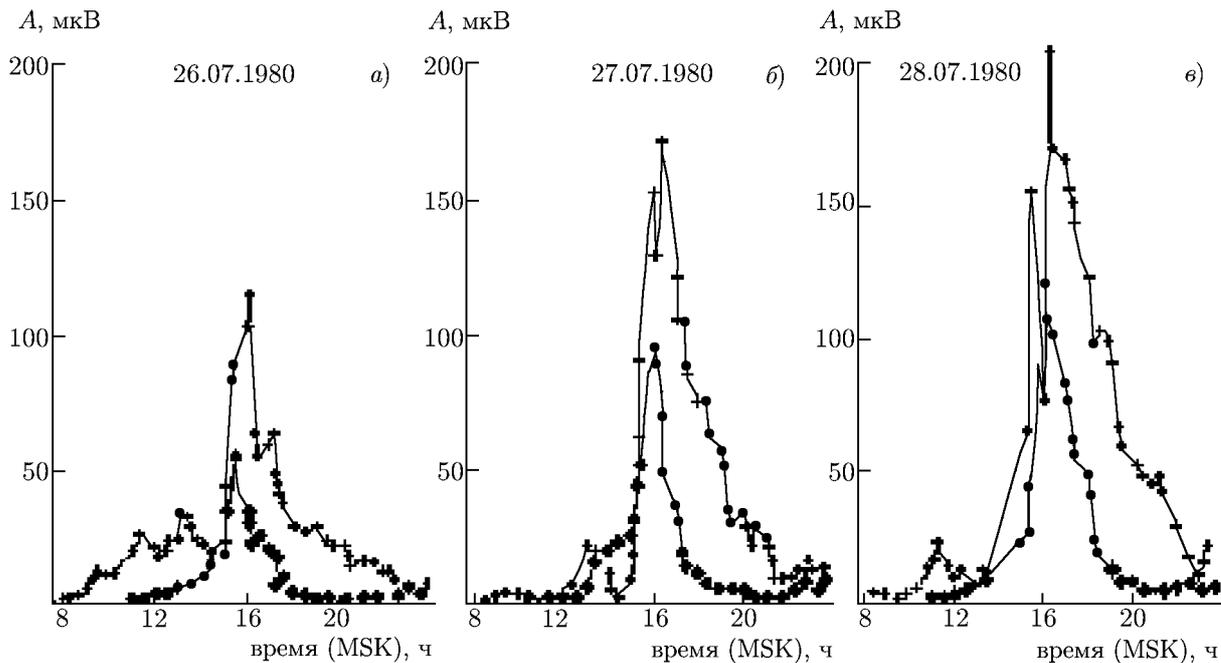


Рис. 3

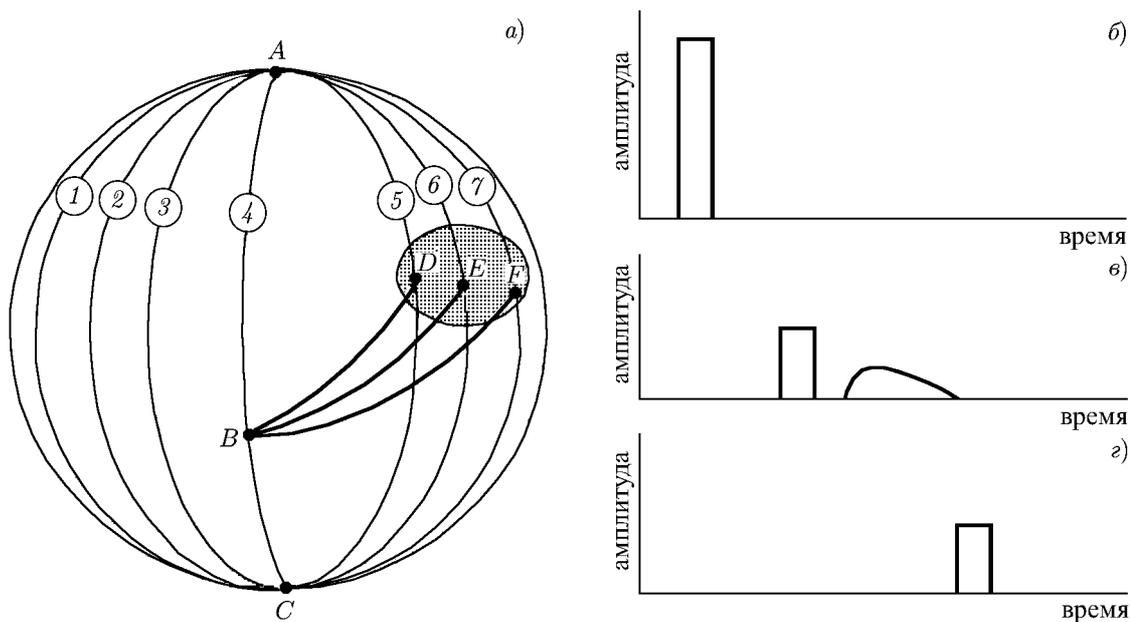


Рис. 4

чиной на дальних радиотрассах является отражение или рассеяние радиоволн областями, расположенными в стороне от прямой радиотрассы, но внутри волновода Земля–ионосфера, неоднородностями ионосферы или земной поверхности, как показано на рис. 4.

На рис. 4а показаны радиотрассы при излучении в точке А и приёме в точках В (вне антиподной области) и С (антиподная точка); на рис. 4б–г приведены качественные временные профили сигнала в точках А, В и С соответственно. В антиподную точку С приходят сигналы по любым трассам (1–7), в точку В — только по трассе 4 (АВ). При наличии области рассеяния

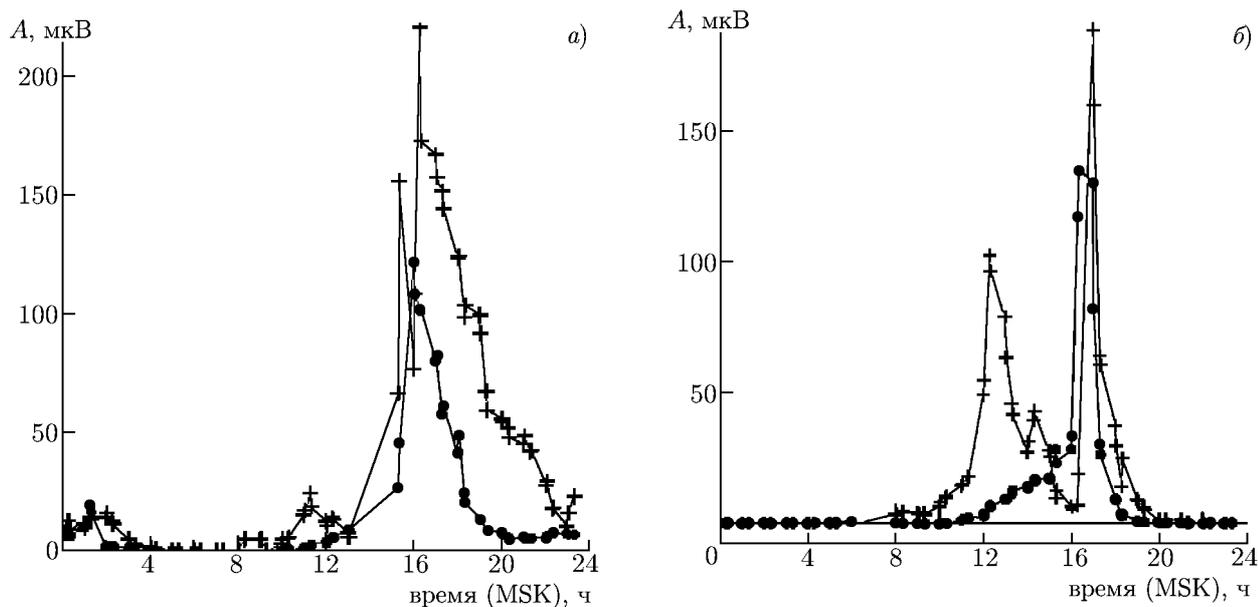


Рис. 5

(заштрихованная область на рис. 4а) в антиподную точку могут попасть лучи, рассеянные в точках D , E и F в направлении «вперёд» и имеющие ту же временную задержку, что и прямой сигнал. Сигналы, рассеянные в этих точках и попавшие в точку B , имеют большее время распространения, чем сигнал, пришедший по пути AB (рис. 4б). В антиподной области сигналов, задержанных по отношению к «прямому» сигналу, нет (рис. 4г). Той же причиной можно объяснить известное свойство малого расплывания по времени распространения кругосветных сигналов [1] — их расплывание возможно только за счёт многолучёвости в вертикальной плоскости. Сигналы, рассеянные в азимутальной плоскости, в точку приёма, совпадающую с точкой излучения, попасть не могут.

На рис. 5 приведены графики суточного хода принимаемых сигналов 28.07.1980 в антиподной точке (а) и 11.07.1980 в точке, отстоящей от антиподной на $2,6 \cdot 10^3$ км и лежащей на трассе Иркутск—антиподная точка Иркутска с углом наклона трассы к плоскости экватора $\delta = 59,7^\circ$.

Как видно из рис. 5, в обеих точках суточный ход амплитуды сигналов ведёт себя схожим образом. На обеих трассах максимальная за сутки амплитуда сигнала достигается в 16:00–16:30 MSK, что соответствует времени совпадения трассы с линией терминатора. В антиподной точке её величина несколько больше, чего и следовало ожидать. В это время трасса Иркутск—точка наблюдения—антиподная точка проходила вблизи линии терминатора, плоскость которого в это время года имела наклон к плоскости экватора 68° , и условия распространения радиоволн на ней соответствовали оптимальным (сочетание высоких критических частот ионосферы с малым ионосферным поглощением). Примерно в эти же часы наблюдались и максимальные за сутки амплитуды сигналов обратного эха станции РИД; их амплитуда была примерно в 10 раз меньше. Ещё один максимум амплитуды, наблюдавшийся около 12:00 MSK, как показывают результаты моделирования, связан с появлением рикошетирующих мод распространения, а провал с 13 до 16 ч — с их исчезновением. Однако в эти часы сравнивать уровни сигналов на этих радиотрассах, по-видимому, нельзя, т. к. в них наилучшие условия распространения для антиподной точки существуют на трассе, не проходящей через точку приёма.

Эксперименты показали, что в антиподной области наблюдается чётко выраженный суточный ход амплитуды принимаемого сигнала, которая в течение суток меняется примерно на 60 дБ.

Оптимальные условия радиосвязи наступают в часы сближения трассы с линией терминатора, что соответствует известным результатам [1]. На ряде частот сигнал принимается круглосуточно, что позволяет поддерживать постоянную радиосвязь. Важным обстоятельством является то, что с приближением к антиподной области интервал многолучёвости сужается; это можно назвать групповой фокусировкой. Она объясняется тем, что в антиподную область, где происходит суммирование, сигнал может попасть только вдоль одной из дуг с протяжённостью $2,0 \cdot 10^4$ км, связывающих передатчик и приёмник. Интервал многолучёвости в антиподной области формируется только за счёт многолучёвости в вертикальной плоскости и редко превышает $3 \div 5$ мс.

ВЫВОДЫ

Измерения показали, что в антиподной области наблюдалось увеличение уровня принимаемых сигналов и суммарного времени их прохождения (в течение суток). На ряде частот прохождение становится круглосуточным.

Наиболее интересным эффектом, наблюдавшимся в антиподной области, является сужение диапазона задержек сигналов многолучёвости. Наблюдается только многолучёвость с задержками до $3 \div 5$ мс, связанная с распространением по прямой радиотрассе с разным числом скачков и определяемая различием вертикальных углов излучения.

В области, далёкой от антиподной, задержки многолучёвых сигналов могут достигать нескольких десятков миллисекунд, уменьшаясь с приближением к антиподной области до нескольких миллисекунд. Возможна ситуация отсутствия прямых сигналов при приёме значительных по амплитуде рассеянных сигналов с большим временем распространения.

Полученные результаты говорят о том, что при расположении корреспондента в антиподной области можно добиться многократного уменьшения интервала многолучёвости, увеличения уровня принимаемого сигнала и увеличения времени его приёма в течение суток. Вместе с тем следует отметить, что сопоставление результатов измерений на трассах с большой протяжённостью с результатами расчётов в настоящее время малоэффективно. Причинами являются недостаточность данных о состоянии ионосферы вдоль трасс распространения сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлионский А. Г. Дальнее распространение радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1979. 267 с.
2. Всехсвятская И. С., Калинин Ю. К. // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. № 3. С. 470.
3. Грудинская Г. П. Распространение коротких и ультракоротких радиоволн. М.: Радио и связь, 1981. 78 с.
4. Альперт Я. Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 480 с.
5. Bold G. E. J. // J. Atmos. Terr. Phys. 1969. V. 31, No. 12. P. 1391.
6. Gerson N. C., Henger J. G., Pipp R. M., Webster J. B. // Canad. J. Phys. 1969. V. 47, No. 20. P. 2143.
7. Брянцев В. Ф., Ежов А. И., Климов Н. И. и др. // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1984. Вып. 67. С. 188.
8. Брянцев В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 3. С. 395.
9. Брянцев В. Ф., Птицын А. С. // Труды 16 Международной научно-технической конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2010. Т. 3. С. 1303.
10. Брянцев В. Ф. // Труды 13 Международной научно-технической конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2007. Т. 2. С. 1083.

11. Брянцев В. Ф., Птицын А. С., Стародубровский А. С. // 23 Всерос. науч. конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, МарГТУ, 2011. Т. 3. С. 47.

Поступила в редакцию 11 октября 2012 г.; принята в печать 30 октября 2012 г.

ANTIPODAL PROPAGATION OF DECAMETER RADIO WAVES

V. F. Bryantsev

We consider specific features of the antipodal propagation of decameter radio waves based on long-range radio-path measurement data. The measurements were carried out at frequencies of 10 and 15 MHz onboard a research vessel when it crossed the antipodal area of the RID universal-time station located near the city of Irkutsk. Reduced multipath-effect band, increased level of received signals in the antipodal area, and details of diurnal variations of the signal amplitude are discussed.