

УДК 621.396.67.550.388

ГЕОМАГНИТНЫЙ ФАКТОР *Dst*-ВАРИАЦИЙ В СЕЛЕКТИВНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ИОНОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ВОЛН

© 2006 г. В. П. Сивоконь, Г. И. Дружин

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка (Камчатская область)

e-mail: drug@ikir.kamchatka.ru

Поступила в редакцию 11.04.2005 г.

После доработки 12.10.2005 г.

На трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский в диапазоне коротких волн проведены эксперименты по излучению волн вращающейся поляризации. Получено, что степень подавления одной из характеристических волн в процессе селективного поляризационного возбуждения зависит от величины и знака *Dst*. Установлено, что наибольшие изменения в отношении амплитуд сигналов, принятых с антенн правой и левой поляризаций, наблюдаются при спокойном магнитном поле Земли и когда *Dst* положительно. В условиях средней возмущённости геомагнитного поля и отрицательных значениях *Dst* возбуждение одной из характеристических волн на передающей стороне не исключает присутствия в пункте приема второй характеристической волны. Основной причиной маскирования селективного поляризационного возбуждения одной из характеристических волн может быть увеличение неоднородностей ионосферы.

PACS numbers: 94.30.Tz

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов снижения замираний, при передаче радиосигнала на коротких волнах, является селективное поляризационное возбуждение одной из характеристических волн. При этом считается [Арефьева, Березин, 1991], что подавление одной из них уменьшит интерференционные замирания в пункте приема. Следовательно, основной задачей в этом случае становится согласование поляризационных характеристик излучаемой волны с поляризационными характеристиками одной из характеристических волн. Для коротких волн, с учетом влияния подстилающей поверхности на поляризационные характеристики передающей антенны и нерегулярности высоты отражающего слоя, решение задачи поляризационного согласования становится довольно сложным. Тем не менее, при проведении экспериментальных исследований [Фалькович, 1995] подавление одной из характеристических волн составляла от 6 до 16 дБ.

Эксперименты с применением на передающей стороне антенн вращающейся поляризации, проведенные на трассе Магадан – Камчатка, показали снижение замираний в пункте приема. При этом использовался аппаратный комплекс [Сивоконь и др., 2004], позволявший последовательно излучать волны с различными поляризационными характеристиками. В качестве передающей применялась турникетная антенна с коммутатором линий задержек различной длины. В пункте

приема одновременно осуществлялась запись сигналов с антенн линейной (вертикальной) и эллиптических (правой и левой) поляризаций. Рабочая частота сигнала при проведении эксперимента ≈ 10.5 МГц.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Если исходить из того, что снижение замираний вызвано подавлением одной из характеристических волн, тогда в пункте приема должна преобладать волна с одним направлением вращения вектора напряженности электрического поля. Первые измерения показали, что в пункте приема присутствуют две волны с противоположным направлением вращения вектора электрического поля вне зависимости от того, с какой из характеристических волн согласовывались поляризационные характеристики излучаемой волны.

Считая, что этот эффект объясняется недостаточным согласованием поляризационных характеристик излучаемой и характеристической волн, нами были предприняты шаги по достижению этого согласования. На первом этапе исследований в антенном коммутаторе использовалась одна линия задержки длиной $\lambda/4$ (λ – длина волны), включением которой в один из вибраторов передающей антенны достигалось изменение направления вращения вектора напряженности электрического поля результирующей волны. Сигнал принимался с антенн правой и левой поляризации на два радиоприемника. При передаче сигнала пара-

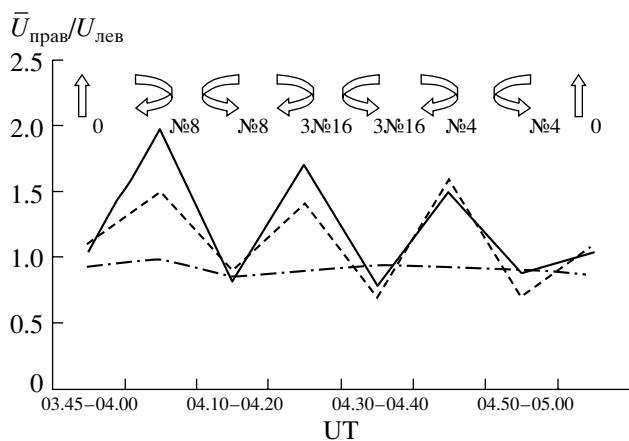


Рис. 1. Отношение средних значений сигнала $U_{\text{прав}}/U_{\text{лев}}$, принятых с антенн правой и левой полярizations. Время в цикле измерения – универсальное. 1 – 5 февраля; 2 – 26 февраля; 3 – 27 февраля 2004 г.

метры поляризационного эллипса результирующей волны не менялись. Поэтому стали изменять высоту подвеса передающей антенны, что с учетом влияния подстилающей поверхности существенно меняло поляризационные характеристики излучаемой волны. Тем не менее, прогнозируемого подавления одной из волн получить не удалось.

На следующем этапе исследований применили антенный коммутатор, который позволял менять поляризационные характеристики излучаемой волны дискретно, путем комбинации линий задержек различной длины. На приемной стороне применили синхронный коммутатор, который позволил использовать для оценки сигналов с антенн различной полярizations один и тот же приемник, что существенно увеличило точность измерения. При этом существенной разницы в амплитуде сигналов с антенн противоположной полярizations получить не удалось.

26 февраля 2004 г. при проведении измерений, не связанных с данной проблемой, было зафиксировано четкое перераспределение величин сигналов с антенн противоположной полярizations. Увеличение количества дней наблюдений позволило зафиксировать неоднократное повторение данного эффекта. В качестве примера на рис. 1 приведено отношение средних значений сигналов с антенн противоположной полярizations для экспериментов 5, 26 и 27 февраля 2004 г. В верхней части рисунка стрелками обозначен тип полярizations излучаемой волны и длина линии задержки, включаемой в одно из плеч турникетной антенны.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим причину перераспределения сигналов с антенн противоположной полярizations. Поскольку никаких изменений в условиях проведения экспериментов не проводили, предположили, что эффект четкого перераспределения сигналов вызван изменением условий распространения волн. Причина четкого перераспределения 26 февраля 2004 г. может быть за счет **изменения**:

- поляризационного согласования, при котором увеличивается степень совпадения поляризационных характеристик падающей и характеристической волн;
- состояния ионосферы.

Изменение поляризационного согласования могло быть вызвано либо изменением свойств подстилающей поверхности, либо изменением высоты отражающего слоя, поскольку высота подвеса передающей антенны была фиксированной. Для исключения возможного изменения свойств подстилающей поверхности сравнение данных сделали для экспериментов, проводившихся в один сезон года, а именно, в феврале – марте 2004 г. Для района проведения эксперимента этот сезон характеризуется стабильным промерзанием почвы и, следовательно, неизменными значениями проводимости и диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности.

Из рассмотрения ионограмм удалось установить, что для времени проведения экспериментов высота отражающего слоя менялась, но не настолько, чтобы вызвать существенное изменение угла возвышения. В свою очередь, незначительное изменение угла возвышения не могло быть причиной существенного изменения поляризационных характеристик излучаемой волны.

Из характера изменения высоты отражающего слоя было видно, что в те дни, когда перераспределение сигналов было явно выраженным, изменение высоты во время проведения эксперимента было медленным и монотонным. И, наоборот, в дни, когда перераспределение сигналов было незначительным, изменение высоты было быстрым и случайным. Стало очевидным, что **причиной изменения поляризационного согласования являются динамические процессы, влияющие на структуру регулярной ионосферы.**

Были рассмотрены значения Kp - и Dst -индексов во время проведения экспериментов, взятые из Банка данных Университета Киота (www.kugi.kyoto-u.ac.jp). Вариации величины Dst для времени проведения экспериментов приведены на рис. 2. Величины Kp -индекса для времени проведения экспериментов составляли 5 февраля – 3; 26 февраля – 1; 27 февраля – 3+.

Анализ значений Kp - и Dst -индексов позволил установить, что величина изменений отношения

сигналов с приемных антенн противоположной поляризации при излучении волн различной поляризации определяется величиной и знаком *Dst*-индекса. Четкое перераспределение отношений сигналов наблюдается при спокойном магнитном поле Земли и когда величина *Dst*-индекса положительна. В условиях средней возмущенности магнитного поля Земли и отрицательных значениях величин *Dst*-индекса возбуждение одной характеристической волны на передающей стороне не исключает присутствия волны с поляризационными свойствами второй характеристической волны в пункте приема. При этом в пункте приема будет наблюдаться незначительное преобладание одной из них. Основной причиной подобного “маскирования” селективного поляризационного возбуждения одной из характеристических волн, на наш взгляд, является увеличение неоднородностей электронной концентрации в ионосфере, как следствие возмущенного состояния магнитного поля Земли. Размеры этих неоднородностей лежат в пределах первой зоны Френеля [Гельберг, 1986], которая в области отражения волны в нашем случае составляет ~3 км. Если принять, что мелкомасштабные неоднородности имеют размеры $l < 5$ км, а крупномасштабные $l > 5$ км, то эффект “маскирования” поляризационного возбуждения основан на увеличении мелкомасштабных неоднородностей. Такое представление основывается и на выводе, сделанном в работе [Солодовников и др., 1990] о том, что дифракционные эффекты в ионосфере вызываются в основном мелкомасштабными неоднородностями, количество которых связано с состоянием магнитного поля Земли.

Результаты проведенных в феврале – марте 2004 г. измерений и величины *Kp*- и *Dst*-индексов, соответствующие времени проведения экспери-

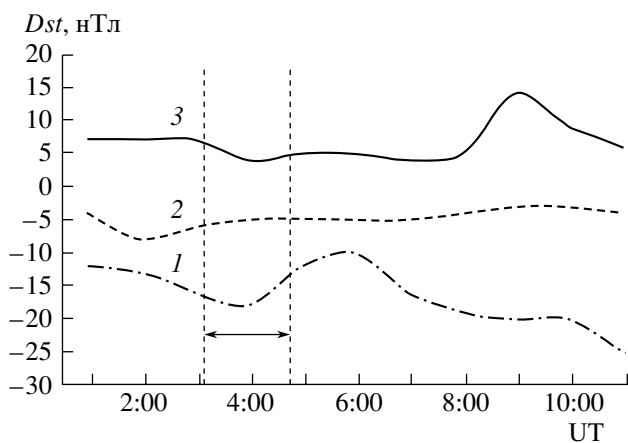


Рис. 2. Величина *Dst*-индекса для разных дней наблюдений: 1 – 5 февраля; 2 – 26 февраля; 3 – 27 февраля 2004 г. Стрелками указано время проведения эксперимента.

ментов, приведены в таблице. В августе–сентябре 2003 г. экспериментальные исследования проводились тем же способом, что и в феврале 2004 г., однако значительного перераспределения в отношении принимаемых сигналов правой и левой поляризации не наблюдалось. Для объяснения этого эффекта мы обратились опять же к геомагнитным данным. Поскольку эффект явного перераспределения между сигналами с антенн противоположной поляризации проявлялся при величине $Dst \geq -10$ нТл, путем обработки геомагнитных данных мы рассчитали процент времени, когда величина $Dst \geq -10$ нТл. Оказалось, что в сентябре 2003 г. процент времени с благоприятными геомагнитными условиями составил 9.4%, в августе – 8.6%, а в феврале 2004 г. – 31.6%. Так как цикл измерения составлял 1.5 ч очевидно, что вероят-

Отношение амплитуд сигналов $U_{\text{прав}}/U_{\text{лев}}$, принятых с антенн правой и левой поляризации и величин *Kp*- и *Dst*-индексов при проведении экспериментов в 2004 г. на трассе Магадан–Петропавловск–Камчатский по исследованию волн вращающейся поляризации в КВ-диапазоне

Дата проведения эксперимента	Время проведения эксперимента, UT	Параметры магнитного поля Земли в цикле измерения		Максимальное значение $U_{\text{прав}}/U_{\text{лев}}$ в цикле измерения
		<i>Kp</i>	<i>Dst</i> (нТл)	
5.02	00.45–02.15	3	-12 -12 -13	0.99
16.02	00.45–02.15	4-	-36 -32 -33	0.89
25.02	03.45–05.15	2-	-10 -11 -11	1.15
26.02	03.45–05.15	1+	-6 -5 -5	1.5
27.02	03.45–05.15	4-	+7 +4 +5	1.95
4.03	03.45–05.15	2-	+2 0 -8	1.9
6.03	01.45–03.15	1+	-3 -3 -2	1.71
6.03	03.45–05.15	2	-2 -3 -2	1.67
9.03	03.45–05.15	2	-1 -1 -3	1.62

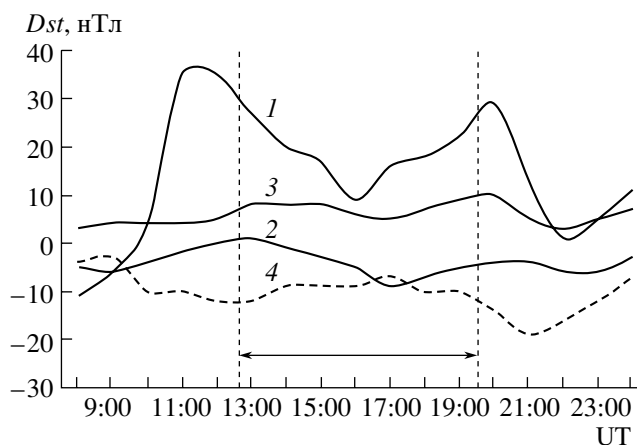


Рис. 3. Величина Dst -индекса для дней экспериментов по селективному поляризационному возбуждению характеристических волн, приведенных в работе [Фалькович, 1995]: 1 – 17 марта; 2 – 19 марта; 3 – 27 марта; 4 – 27 мая 2004 г. Стрелками указано время проведения эксперимента.

ность совпадения времени эксперимента с благоприятными геомагнитными условиями в августе и сентябре 2003 г. очень мала. В феврале 2004 г. вероятность совпадения оказалась намного больше, что позволило обнаружить данный эффект.

Как уже отмечалось выше, в работе [Фалькович и др., 1995] было получено подавление одной из характеристических волн до 16 дБ. Для понимания этих результатов был проведен сравнительный анализ состояния магнитного поля Земли для дней проведения экспериментов в названной работе. Были использованы данные, взятые из Банка данных Университета Киото (рис. 3). Из четырех дат, приведенных в работе, две пришлось на дни спокойного геомагнитного поля: 19 и 20 марта 1992 г. Суммарная за сутки величина Kp -индекса равна соответственно 7+ и 8+, а величина Dst -индекса во время проведения эксперимента изменялась в пределах (+1...–9) нТл и (+5...+10) нТл. Эксперимент 17 марта 1992 г. характеризуется суммой Kp за сутки, равной 29–, и положительной фазой величина Dst с вариациями (+9...+29) нТл. Во время проведения эксперимента 27 мая 1992 г. сумма значения Kp за сутки равна 19+ и вариации величины Dst – (–7...–12) нТл. Из анализа данных следует, что приведенные в этой работе даты соответствуют в основном благоприятным в геомагнитном отношении условиям для селективного поляризационного возбуждения характеристических волн.

Из сравнительного анализа данных, полученных нами и приведенных в работе [Фалькович и др., 1995], можно сделать предварительный вывод о том, что величина подавления одной из характеристических волн, наряду с согласованием

поляризационных характеристик, зависит от величины и знака Dst -индекса. Чем больше отрицательная величина Dst , тем меньше степень подавления.

4. ВЫВОДЫ

Проведены эксперименты по изучению волн вращающейся поляризации на частоте ≈ 10.5 МГц. На трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский получено, что степень подавления одной из характеристических волн в процессе селективного поляризационного возбуждения зависит от величины и знака Dst -индекса. Установлено, что наибольшие изменения в отношении амплитуд сигналов, принятых с антенн правой и левой поляризации, наблюдаются при спокойном магнитном поле Земли и когда величина Dst -индекса положительна. В условиях средней возмущенности геомагнитного поля и при отрицательных значениях Dst -индекса возбуждение одной из характеристических волн на передающей стороне не исключает присутствия в пункте приема второй характеристической волны. Основной причиной маскирования селективного поляризационного возбуждения одной из характеристических волн может быть увеличение мелкомасштабных неоднородностей ионосферой плазмы.

Авторы благодарят профессора Э.Л. Афраймовича, обратившего внимание на роль индекса Dst в наблюдаемом эффекте, и профессора В.В. Кузнецова за ценные замечания и помощь при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 504 с. 1973.
- Арефьева Л.Н., Березин Ю.В. Селективное поляризационное возбуждение волн в ионосферном канале связи // Радиотехника. № 1. С. 6–8. 1991.
- Фалькович И.С., Калинин Н.Н., Станиславский А.А. Экспериментальные исследования наклонного поляризационно-согласованного зондирования ионосферы в декаметровом диапазоне волн // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 6. С. 123–131. 1995.
- Сивоконь В.П., Дружин Г.И., Поддельский И.Н., Поддельский А.И., Аллакулиев Ю.Б., Тарасенко Д.В., Цуканов А.В., Шумилов Ю.С. Аппаратурный комплекс для исследования волн вращающейся поляризации в КВ-диапазоне // Электросвязь. № 8. С. 9–11. 2004.
- Гельберг М.Г. Неоднородности высокоширотной ионосферы. Новосибирск: Наука. 193 с. 1986.
- Солодовников Г.К., Новожилов В.И., Фаткуллин М.Н. Распространение радиоволн в многомасштабной неоднородной ионосфере. М.: Наука. 200 с. 1990.