

УДК 551.510.535 : 621.396.238

ДОПЛЕРОВСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ РАКУРСНОМ РАССЕЯНИИ УКВ НА ИСКУССТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ ИОНОСФЕРЫ

А. В. Коровин, А. М. Насыров, Е. В. Проскурин, Н. Н. Ягнов

Приведены результаты экспериментальных исследований доплеровского сдвига частоты и уширения спектра при ракурсном рассеянии УКВ на искусственных мелкомасштабных ($l_{\perp} = 3$ м) неоднородностях, стимулированных воздействием на область F ионосферы мощного КВ радиоизлучения.

Измерения доплеровского сдвига спектра частот при ракурсном рассеянии радиоволн на искусственных неоднородностях области F ионосферы, стимулированных воздействием мощного КВ радиоизлучения, проводились на КВ и УКВ в работах [1-8]. В них получены значения смещений частоты, соответствующие скоростям дрейфа плазмы в области F , измеренным на естественных неоднородностях [14]. Кроме этого, в [5] обнаружены флуктуации доплеровской частоты с периодом в несколько минут и величиной 1—2 Гц, которые не наблюдались в невозмущенной воздействию мощного радиоизлучения ионосфере. В указанных выше работах анализ частотного спектра проводился в узкой полосе, что не позволило авторам обнаружить быстрые кратковременные флуктуации частоты с большими значениями доплеровских смещений.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование доплеровских изменений частоты, возникающих при воздействии на область F ионосферы мощного КВ радиоизлучения. Для выявления движений в ионосфере, связанных с ее искусственной модификацией, использовался метод ракурсного рассеяния УКВ на стимулированных воздействием мощного радиоизлучения мелкомасштабных неоднородностях, позволяющий отдельно регистрировать сигнал из различных участков возмущенного объема при изменении высоты рассеяния. Измерения проводились на опытной базе Горьковского научно-исследовательского радиофизического института и Казанского университета. Возмущающие ионосферу передатчики размещались в Горьком и Васильсурске. Накачка осуществлялась на частотах 4,6 и 5,75 МГц немодулированной волной обыкновенной поляризации. Нагрев ионосферы проводился в режиме +3, —2 (3 минуты — нагрев, 2 минуты — пауза) в Горьком и режиме +6, —4 — в Васильсурске. Пробный передатчик УКВ располагался в Ростовской, а приемный пункт — в Волгоградской областях. Измерения проводились в октябре 1979 г. и в августе 1980 г. в вечернее время.

На использованной частоте пробного передатчика УКВ регистрировалось ракурсное рассеяние на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} = 3$ м. Для измерения доплеровских сдвигов применялся фазовый метод сличения рассеянной и опорной частот, что позволяло определять фазо-частотный спектр рассеянного сигнала. Известно [1, 13], что такой спектр содержит информацию об угловом положении рассеи-

вателей и изменениях дальности. Фазовый метод требует применения высокостабильных частот на передающем и приемном пунктах [10]. На экспериментальной радиолнии была использована схема синхронизации опорных частот сигналом радиостанции точного времени РБУ. При этом достигалась относительная нестабильность частот передатчика и опорного генератора приемного пункта не хуже $5 \cdot 10^{-10}$ [9]. Измерения доплеровских частот проводились на фазометре, реализованном на базе промышленного двухканального супергетеродинного приемника с общими гетеродинами во всех ступенях преобразования частоты. Аналогичная схема описана в [12].

На один из входов приемника подавался сигнал, рассеянный возмущенной областью, на второй вход — опорная частота, равная по номиналу частоте передатчика. Измерение разности фаз в пределах $0 - 360^\circ$ осуществлялось на промежуточной частоте 60 кГц фазометром с ключевыми цепями [11, 12]. Разность фаз, преобразованная в фазометре в пропорциональное напряжение, регистрировалась быстродействующим самописцем типа Н-338/4 в виде «пилы», направление наклона которой определяется знаком смещения частоты принятого сигнала относительно опорной частоты.

Возможны два способа обработки данных. Первый заключается в определении периода пилообразного напряжения, соответствующего изменению разности фаз на 2π , т. е. среднему периоду T разностной частоты сравниваемых сигналов. Точность измерения T и, следовательно, доплеровского смещения частоты в использованной аппаратуре ограничена стабильностью скорости протяжки ленты самописца, точностью съема данных и равняется $3-5\%$. Максимальное значение доплеровской частоты, которое может быть измерено, ограничено скоростью протяжки ленты самописца. Для самописца типа Н-338/4 $V_{\text{max}} = 250 \text{ мм/с}$ и $F_{\text{д max}}$ не превышает значения 250 Гц . Анализ погрешностей фазометрической аппаратуры, проведенный методом «самопроверки» [11], показал, что суммарная относительная погрешность измерения частоты без учета погрешности, вносимой регистрирующим прибором, не хуже 10^{-9} . Минимальная разностная частота, которая могла быть измерена, ограничивалась точностью съема данных с ленты самописца и равнялась $6 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$ при соотношении сигнал/шум не менее 12 дБ . При описанном способе обработки теряется информация о флуктуациях доплеровской частоты внутри интервала T .

Другой способ обработки основан на измерении угла наклона пилообразного напряжения в заданные моменты времени. При этом дополнительно к перечисленным выше ошибкам возникает погрешность, связанная с влиянием амплитудно-частотной характеристики регистрирующего прибора. Для регистратора Н-338/4 с собственной частотой пи-

сущего механизма 100 Гц амплитуда пилообразного напряжения не зависит от доплеровской частоты в полосе $0-60 \text{ Гц}$. При $F_{\text{д}} = 120 \text{ Гц}$ амплитуда записи уменьшается в 2 раза, при $F_{\text{д}} = 250 \text{ Гц}$ — в 10 раз. Из-за больших амплитудных искажений, вносимых регистратором, этот способ обработки не применялся.

На рис. 1 приведены образцы регистраций напряжения, пропорционального разности фаз рассеянного и опорного сигналов. По оси абсцисс отложено время в секундах. Направление движения ленты указано

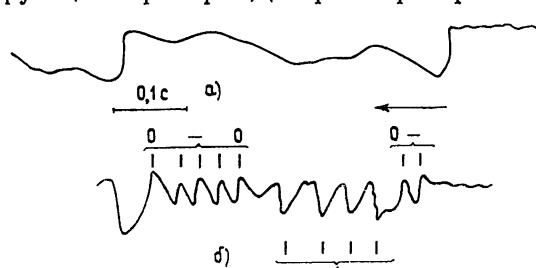


Рис. 1.

стрелкой, интервалы времени T_i , за которые разность фаз изменилась на 2π , отмечены вертикальными штрихами. Знак (+) означает положительные доплеровские смещения частоты, (-) — отрицательные, (0) соответствует моменту изменения знака смещения частоты. На рис. 1 а представлены медленные изменения разности фаз, соответствующие доплеровским частотам $F_d \approx 10$ Гц, на рис 1 б — быстрые изменения разности фаз с периодической сменой знака доплеровского сдвига частоты, соответствующего значению $F_d \approx 100$ Гц. На рис. 1 б хорошо видно, что при больших значениях F_d амплитуда пилообразного напряжения падает, но направление наклона и период (и, следовательно, знак и частота F_d) определяются уверенно. Уменьшение амплитуды выходного напряжения фазометра связано, как указывалось выше, с ограниченностью полосы пропускания регистрирующего прибора.

Можно показать, что при наклонном распространении радиоволн доплеровская частота связана с вектором скорости перемещения неоднородностей соотношением [16]

$$F_d = V k = (-2V/\lambda) \sin(\theta/2) \cos(Vk), \quad (1)$$

здесь $k = k_R - k_T$, k_R и k_T — волновые векторы рассеянной и падающей волн, $|k_R| = |k_T| = 2\pi/\lambda$, $|k| = (4\pi/\lambda)\sin(\theta/2)$, θ — угол рассеяния. На опытной радиолинии Ростов — Горький — Волгоград вектор k направлен

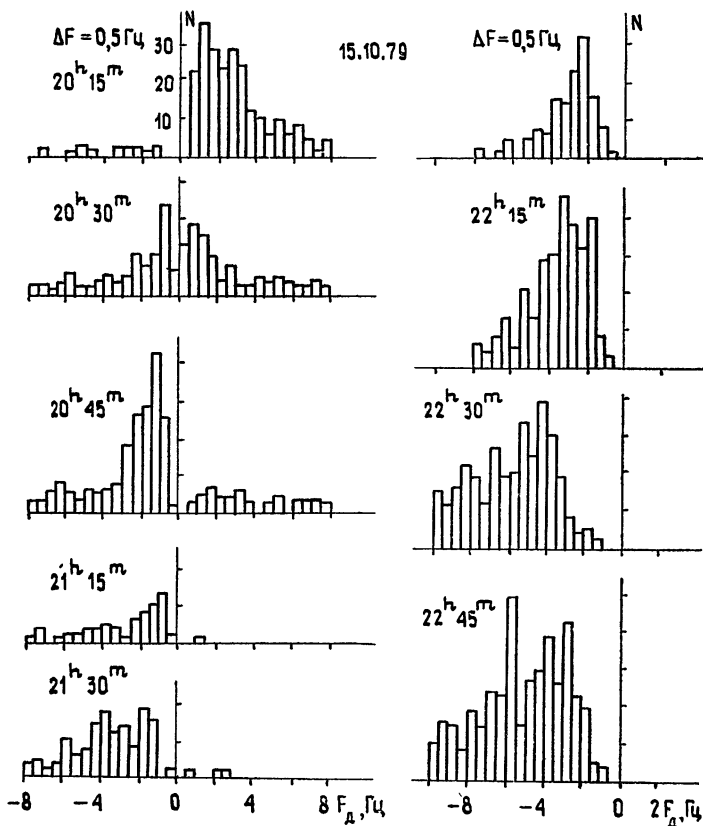


Рис. 2.

под углом 20° к плоскости горизонта пункта нагрева. Угол между проекцией вектора k на эту плоскость и направлением на север равняется 192° , т. е. вектор k расположен близко к плоскости меридиана.

Анализ результатов показал, что измеренные по доплеровскому смещению частоты скорости движения рассеивающих центров имеют

несколько составляющих. Для выявления самых медленных движений были построены распределения доплеровских частот в интервале сдвигов ± 8 Гц. Интервал группирования по частотам при построении распределений выбирался равным 0,5 Гц. Это эквивалентно использованию анализатора спектра с полосой обзора 16 Гц и разрешающей способностью 0,5 Гц. Результаты измерений, выполненных 15.10.79 г. в период с 20 до 23^а при нагреве ионосферы в Василсурске, приведены на рис. 2. Спектры построены через 15-минутные интервалы наблюдений. По рис. 2 хорошо прослеживается постепенное смещение средней доплеровской частоты от значений $-1,5$ до $+6$ Гц со сменой знака в 20^ч 30^м. Такие доплеровские частоты соответствуют изменениям проекции вектора V на направление вектора k от значений $V_k = +5$ м/с до $V_k = -20$ м/с. В работах [1-5] выявлена именно эта составляющая вектора скорости перемещения неоднородностей в возмущенной области и делается вывод, что наблюдаемые доплеровские сдвиги частот отражают существующие в естественной ионосфере дрейфовые движения и являются их прямым следствием. В наших измерениях также не обнаружено какой-либо корреляции между дрейфовой скоростью и циклом работы нагревного передатчика, что подтверждает выводы работ [1, 3, 5] о том, что использование метода рассеяния на искусственных неоднородностях позволяет получить данные о дрейфе в области F ионосферы.

Выше были представлены распределения F_d , построенные в полосе частот ± 8 Гц. Однако в спектре присутствуют и более высокочастотные составляющие. Для их выявления анализ спектра проводился в полосе ± 30 Гц при разрешающей способности эквивалентного фильтра 2,5 Гц. Для примера на рис. 3 приведен спектр, полученный 15.10.79 г. в 20^ч 30^м. Ширина спектра на уровне $1/e$, измеренная по этим данным, равна 8 Гц. Этот результат совпадает с данными работ других авторов. Однако в спектре присутствуют частоты, достигающие

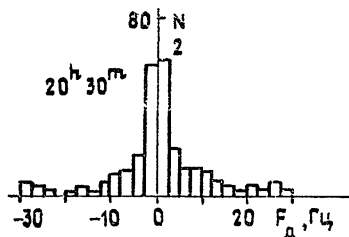


Рис. 3.

крайних значений: полосы обзора ± 30 Гц, что соответствует скоростям дрейфа $V_k = \pm 100$ м/с.

Уширение спектра может вызываться как изменением вектора k в пределах рассеивающего объема, так и наличием случайной составляющей дрейфовой скорости. Согласно [17], ширина частотного спектра за счет различия доплеровских смещений частоты на краях рассеивающего объема равна $\Delta F_d \sim VL/\lambda r$ (где \bar{V} — скорость дрейфа, L — размер области рассеяния, λ — длина волны, r — расстояние от приемного пункта до области рассеяния). В условиях проводившихся измерений $L \approx 50$ км [21], $r \approx 1000$ км. При измерениях в одном пункте вектор скорости полностью не определяется. Для оценок воспользуемся данными работы [20], согласно которой в области F наиболее вероятные значения скорости дрейфа днем равны 40—60 м/с, ночью 100—120 м/с. Принимая для вечерних часов, когда проводились наблюдения, $V = 100$ м/с, имеем $\Delta F_d \leq 1$ Гц. Для максимальных скоростей дрейфа $V = 500$ м/с [20] $\Delta F_d \approx 4$ Гц. Приведенные оценки показывают, что различия доплеровских смещений частоты на краях рассеивающего объема не являются основной причиной уширения спектра. Известно [22], что если помимо общего движения со скоростью дрейфа имеются также относительные скорости различных неоднородностей, происходит дополнительное уширение полосы частот. Считая, что блуждания неоднородностей являются гауссовыми, согласно [18], имеем оценку ширины спектра $\Delta F_d \approx (2\sqrt{2}/\lambda) \sqrt{\bar{V}^2}$. Для измеренного значения $\Delta F_d = 8$ Гц

среднеквадратичное значение случайной компоненты скорости $\sigma_v = \sqrt{V^2} \approx 18 \text{ м/с}$.

При ракурсном рассеянии возможно появление еще одной причины уширения спектра, связанной с тем, что при нагреве на фиксированной частоте смещение возмущенной области по вертикали из-за суточных колебаний электронной плотности приводит к перемещению рассеивающего в направлении на приемный пункт участка возмущенной области (ВО) вдоль зеркальной поверхности [19]. При этом с ростом высоты наблюдается смещение к северу. По измерениям углов места Θ принятой волны на приемном пункте и высоты отражения волны накачки в пункте нагрева было определено, что величина скорости перемещения рассеивающего объема по зеркальной поверхности в среднем во время доплеровских измерений равнялась 100 м/с . Так как при таком перемещении происходит лишь смена неоднородностей, освещаемых передающей и приемной антеннами, а не их перемещение в пространстве, наблюдается не доплеровское изменение частоты, а уширение спектра. По порядку величины уширение за счет этой причины равно [15] отношению скорости изменения угла места Θ области рассеяния к угловой ширине области рассеяния Θ_p : $\Delta F \sim (1/\Theta_p) (\partial\Theta/\partial t)$. При скорости скольжения $V_c = 100 \text{ м/с}$ $(\partial\Theta/\partial t) \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$. Угловой размер области рассеяния $\Theta_p \approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$. Величина $\Delta F_d \approx 10^{-4} \text{ Гц}$, т. е. пренебрежимо мала. Приведенные выше оценки показывают, что основной причиной уширения спектра, по-видимому, следует считать наличие случайной составляющей скорости движения неоднородностей.

Выше были выявлены медленные вариации дрейфовой скорости в области F , связанные с суточными изменениями циркуляции ионосферной плазмы. Для выделения более кратковременных флуктуаций скорости было произведено усреднение данных по 15-секундным интервалам в течение каждого цикла нагрева. Такая обработка позволила выделить флуктуации вектора скорости со средним периодом порядка единиц минут. Разброс скоростей внутри одного 6-минутного цикла нагрева достигал значений 12 м/с . Какой-либо зависимости от цикла нагрева обнаружить не удалось. Поэтому можно считать, что такие колебания скорости присущи дрейфам в естественной ионосфере.

Использование фазового способа сличения частот позволило обнаружить составляющие скорости V_x с характерными периодами изменения направления движения порядка 1 и 0,2—0,3 с. Соответствующие таким скоростям изменения фазы принятого сигнала приведены в качестве примера на рис. 1 б. В результате высокой ракурсной чувствительности механизма рассеяния на искусственных мелкомасштабных неоднородностях области F ионосферы возникает возможность отдельной регистрации сигнала из различных участков возмущенной области при изменениях высоты отражения волны накачки. Анализ экспериментальных данных, полученных при нагреве как в Горьком, так и в Васильурске показал, что при регистрации сигнала из центральных частей ВО вероятность появления быстрых доплеровских изменений частоты $P(F_0)$ выше, чем при приеме сигнала из периферийных участков ВО. Это видно из рис. 4, на котором приведены изменения $P(F_0)$ (пунктирная кривая) и изменения уровня u рассеянного сигнала (сплошная кривая) во времени, полученные при нагреве в Васильурске 15.10.1979 г. На рис. 4 величины $P(F_0)$ и u , нормированные к максимальным значениям, зарегистрированным за время наблюдения, отложены по оси ординат. По оси абсцисс указано время. Для демонстрации выбран день, когда изменение высоты отражения волны накачки было немонотонным, и ВО в процессе эксперимента дважды пересекла поверхность зеркальной области рассеяния, что привело к появлению двух максимумов в уровне сигнала. Каждый из этих максимумов соответствует моменту времени, когда

центральная часть возмущенного объема пересекает поверхность зеркального рассеяния опытной радиолинии. Из рис. 4 видно, что изменения $P(F_6)$ коррелированы с изменениями u . На рис. 4 интервалы времени до 20^h 30^m, с 21^h до 22^h и после 22^h 45^m соответствуют регистрации сигнала, рассеянного периферийными частями ВО; в интервалах 20^h 30^m—21^h, 22^h—22^h 45^m рассеяние обеспечивалось центральными частями ВО. Обнаруженное различие значений $P(F_6)$ в пределах возмущенного объема вероятнее всего вызвано изменением мощности накачки в пределах диаграммы направленности антенны нагревного передатчика.

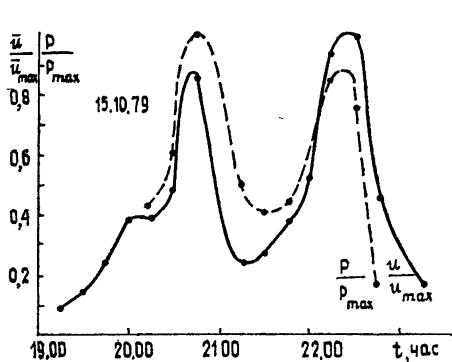


Рис. 4.

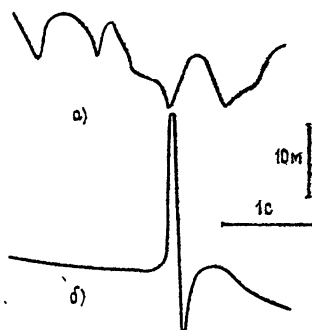


Рис. 5.

Известно [13], что фазо-частотный спектр содержит информацию об изменениях дальности до области рассеяния. Используя непрерывные регистрации разности фаз между принятым и опорным сигналами были построены изменения дальности от времени. Так как мы использовали для получения доплеровских частот периоды времени T , за которые разность фаз изменялась на 2π , то за время T проекция смещения s_k области рассеяния на направление вектора k равна $\lambda/2$. Последовательно суммируя значения s_k с учетом знака доплеровского смещения частоты, можно получить изменения дальности во времени. На рис. 5 приведены примеры такой обработки для быстрых доплеровских смещений частоты. По горизонтальной оси указан масштаб времени в секундах, по вертикальной оси — масштаб изменения расстояния в метрах. Средний наклон кривых на рис. 5 определяется дрейфовой компонентой скорости и минутными флуктуациями. На них накладываются быстрые составляющие, имеющие колебательный характер изменения дальности. Эти колебания могут быть разделены на два типа. Для первого (рис. 5а) характерны периоды изменения направления перемещения порядка секунды, среднее значение смещения достигает 10 м, скорость $V_k \approx 40$ м/с. Такие колебания имеют общую продолжительность до 10 с. Для второго типа (рис. 5б) характерны периоды 0,2—0,3 с, изменения дальности достигают значений порядка 100 м, скорость перемещения V_k — до 800 м/с. Продолжительность колебаний второго типа — до одной секунды.

Выше предполагалось, что быстрые доплеровские сдвиги частоты были вызваны изменениями дальности до области рассеяния. Однако они могли вызываться и изменениями показателя преломления, связанными, например, с прохождением через диаграммы направленности передающей или приемной антенны крупномасштабных неоднородностей с размерами порядка первой зоны Френеля $L_\phi = \sqrt{\lambda R} \approx 2$ км. Оценим, с какими скоростями должны перемещаться такие неоднородности, чтобы вызвать кратковременные быстрые изменения доплеровской частоты. Для колебаний первого типа с характерным перио-

дом изменения знака доплеровского смещения $T \approx 1$ с должно быть $V \approx 2$ км/с. Для колебаний второго типа с $T = 0,2 \div 0,3$ с $V \approx 7 \div 11$ км/с. Такие скорости дрейфа для среднеширотной ионосферы являются нереальными, и объяснить обнаруженные в эксперименте быстрые доплеровские изменения частоты за счет обсуждавшегося механизма нельзя. Корреляция вероятности появления таких смещений с уровнем рассеянного сигнала, обнаруженная по измерениям при нагреве ионосферы в Горьком и Васильсурске, свидетельствует в пользу их искусственного происхождения.

В заключение авторы выражают благодарность Л. М. Ерухимову, Н. А. Митякову за постановку задач исследования ракурсного рассеяния, помощь в организации экспериментальных работ и обсуждение полученных результатов, Л. В. Гришкевичу — за предоставление ионосферных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fialer P. A. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 923.
2. Allen E. M., Thom G. L., Rao P. V. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 905.
3. Mincoff J., Kugelmann P., Weissman J. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 941.
4. Carpenter G. B. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 965.
5. Беленов А. Ф. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1805.
6. Мясников Е. И., Фролов В. Л. Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по проблеме «Неоднородная структура ионосферы». — Ашхабад: ЫЛЫМ, 1979.
7. Ерухимов Л. М. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1814.
8. Коровин А. В. и др. — В сб.: Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. — Апатиты, 1979, с. 5.
9. Эталонные сигналы частоты и времени. Бюллетень, 04. — М.: Изд. Стандартов, 1980.
10. Бочкарев Г. С. и др. — Препринт ИЗМИРАН, № 34 (300). — М., 1980.
11. Галакова О. П. и др. Основы фазометрии. — Л.: Энергия, 1976.
12. Мирский Г. Я. Радиоэлектронные измерения. — Л.: Энергия, 1975.
13. Караваев В. В., Сазонов В. В. — Основы теории синтезированных апертур. — М.: Сов. радио, 1974.
14. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. — Новосибирск: Наука, 1979.
15. Колчинский В. Е. и др. — Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. — М.: Сов. радио, 1975.
16. Кузнецов Э. И., Щеглов Д. А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. — М.: Атомиздат, 1974.
17. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику, ч. II. — М.: Наука, 1978.
18. Горелик Г. С. — Радиотехника и электроника, 1956, 1, № 6, с. 695.
19. Коровин А. В., Насыров А. М., Проскурин Е. В., Ягнов Н. Н. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 6, с. 675.
20. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — М.: Наука, 1972.
21. Коровин А. В., Насыров А. М., Проскурин Е. В., Ягнов Н. Н. XIII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. Тезисы докладов, ч. 1. — М.: Наука, 1981, с. 203.
22. Татарский В. И. — Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1967.

Казанский государственный
университет

Поступила в редакцию
13 июня 1980 г.,
после доработки
6 августа 1981 г.

DOPPLER FREQUENCY MEASUREMENTS IN FORESHORTENED SCATTERING OF VHF WAVES BY ARTIFICIAL INHOMOGENEITIES OF THE IONOSPHERE

A. V. Korovin, A. M. Nasyrov, E. V. Proskurin, N. N. Yagnov

Experimental results are given for the Doppler frequency shift and the spectrum broadening in foreshortened scattering of VHF waves by artificial small-scale ($l_{\perp} = 3$ m) inhomogeneities, stimulated by action of a powerful HF radiation on the ionosphere region.