

УДК 551.510.535 : 621.396.238

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ЧАСТОТНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ПОЛЯ, РАССЕЯННОГО МЕЛКОМАСШТАБНЫМИ ИСКУССТВЕННЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ОБЛАСТИ F ИОНОСФЕРЫ

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

Приведены результаты экспериментальных измерений пространственной и частотной корреляции амплитуд огибающей сигнала, рассеянного искусственными мелкомасштабными неоднородностями области F , стимулированными воздействием на нее мощного КВ радиоизлучения. Показано, что при рассеянии на неоднородностях с поперечными масштабами $L_{\perp} = 3$ м радиус пространственной корреляции в направлении на возмущенную область равен 1000 м, поперек этого направления — 70 м. Получена экспериментальная зависимость коэффициента корреляции от ориентации измерительных баз относительно направления на возмущенную область. В вечерние и ночные часы радиус частотной корреляции равен 1—1,2 кГц. Оценены характерные размеры области ракурсного рассеяния.

Исследование корреляционных характеристик рассеянного поля представляет практический интерес с точки зрения как определения характерных размеров рассеивающей области, так и использования методов разнесения для борьбы с замираниями рассеянного сигнала. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование частотной и пространственной корреляции полей, рассеянных мелкомасштабными искусственными неоднородностями области F ионосферы, стимулированными воздействием мощного КВ радиоизлучения.

1. Методика измерения коэффициента корреляции рассеянного поля. Экспериментальные исследования пространственной и частотной корреляции проводились на радиотрассах Ростов—Астрахань и Ростов—Волгоград в 1978—1980 гг. на УКВ при рассеянии пробной радиоволны искусственной турбулентностью над нагревным стендом в г. Горьком. Нагревной стенд эффективной мощностью около 20 МВт работал на частоте 5,75 МГц. Подробное описание экспериментальных радиополос представлено в работе [1]. В настоящей работе приведены только некоторые данные, необходимые для анализа результатов наблюдений. Пробная радиоволна излучалась с помощью четырех синфазно включенных пятиэлементных антенн типа «волновой канал». Ширина главного лепестка диаграммы направленности такой антенны равна $10 \times 13^\circ$ (в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно). Ориентация и высоты подвеса передающей и всех приемных антенн выбирались такими, чтобы они своим главным лепестком «освещали» возмущенную область над нагревным стендом на высотах 230—350 км.

Исследования пространственной корреляции проводились в Астрахани. Для приема использовались одиночные пятиэлементные полотна «волновой канал» с шириной главного лепестка диаграммы направленности $10 \times 70^\circ$. Для исследования применялись четыре разнесенные антенны, три из которых устанавливались стационарно, четвертая — на базе автомобиля ЗИЛ-157. Такой набор антенн позволил получить раз-

личные по длине и ориентации базы. В направлении на возмущенную область размеры баз равнялись 50, 100, 150 м и 180, 430, 610 м в различных циклах наблюдения. В поперечном направлении использовались базы длиной 20, 40, 60 м. Кроме этого, базы ориентировались под углами 22° к направлению на возмущенную область (разносы 25 и 110 м), 39° (20, 40, 60 м) и 51° (60, 100, 160 м).

Для исследования частотной корреляции излучение передатчика модулировалось низкой частотой F_m , равной в различных циклах наблюдения 250, 500, 750 и 1500 Гц. Благодаря этому в спектре излученного сигнала кроме несущей появились составляющие, отличающиеся от нее на частоты, кратные частоте модуляции. Для их выделения на приемном пункте три демодулирующие приставки Р-371 с полосой пропускания 200 Гц настраивались на несущую и две первые боковые частоты. Ослабление уровня частотных составляющих с ростом их номера позволило использовать только первые боковые частоты. При этом частотные разносы равны F_m и $2F_m$. Все демодулирующие приставки через согласующий разветвитель подключались к выходу одного приемника Р 250-М, полоса пропускания которого устанавливалась больше значения $2F_m$. В остальном схема регистрации аналогична приведенной в [1]. Измерения частотной корреляции выполнялись в июле—октябре 1979 г. в вечерние и ночные часы на приемных пунктах в Астрахани и Волгограде. В качестве приемной антенны в Астрахани использовалась пятиэлементная антенна типа «волновой канал». В Волгограде прием осуществлялся на ромбическую антенну РГ (65/4) 1,6 с оптимальной длиной волны 3,7 м. Ширина главного лепестка диаграммы направленности этой антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях равна 16 и 20° соответственно.

Принятые в разнесенных каналах сигналы после детектирования регистрировались на ленте самописца НЗ38 со скоростью протяжки 50 мм/с. Коэффициент корреляции амплитуды A огибающей сигнала определялся по выборкам объемом 100—200 значений амплитуды при дискретности отсчетов 0,1 с по известной методике (см., например, [2]):

$$\rho_A = N^{-1} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})(\sigma_x \sigma_y)^{-1}, \quad (1)$$

где N — объем выборки, x_i, y_i — амплитуды сигнала в двух каналах регистрации, $\bar{x}, \bar{y}, \sigma_x, \sigma_y$ — средние значения и среднеквадратичные отклонения амплитуд в этих каналах. Полученные для каждого разноса значения коэффициента корреляции (не менее 10 значений) усреднялись и определялись 90-процентные доверительные интервалы [2].

В статистической радиофизике используют корреляцию рассеянного поля $\rho_E = \overline{E_1 E_2^*}$, которая определяется характеристиками рассеивающего объема. Связь этой корреляционной функции с полученной в эксперименте корреляционной функцией огибающей сигнала устанавливается в рамках теории однократного рассеяния при рэлеевском законе распределения амплитуд огибающей сигнала [3, 4]. Используя результаты работ [3, 5], можно получить зависимость

$$\rho_A = (2\alpha - \pi)(4 - \pi)^{-1}, \quad \alpha = 2E(p) - (1 - p^2)K(p), \quad (2)$$

где $K(p), E(p)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода, $p^2 = \rho_E \rho_E^*$. Выражение (2) может быть представлено в виде ряда по степеням p^2 [3, 5]:

$$\rho_A = \pi(4 - \pi)^{-1} p^2 \left\{ (1/4) + \sum_{n=1}^{\infty} [(2n - 1)!! / (2n + 2)!!]^2 p^{2n} \right\}. \quad (3)$$

При $p \ll 1$ сумма ряда $M = \sum_{n=1}^{\infty} [(2n-1)!!/(2n+2)!!]^2 p^{2n}$ мала в сравнении с $1/4$. Значение этой суммы находится в интервале $0 \leq M \leq M_0 = (4-\pi)/\pi - 1/4 = 0,023$ при изменении p от 0 до 1. При $M = M_0$ имеем $\rho'_A = [\pi/(4-\pi)] p^2 [(1/4) + M_0] = p^2$.

В табл. 1 приведены результаты расчета коэффициента корреляции флуктуаций амплитуды в зависимости от коэффициента корреляции поля p , вычисленные по формуле (2) с использованием табличных значений $E(p)$ и $K(p)$ и по аппроксимации $\rho'_A = p^2$. Там же приведена величина ошибки аппроксимации $\Delta\rho = \rho'_A - \rho_A$. Из табл. 1 видно, что различие между значениями ρ_A и ρ'_A не превышает $\sim 0,026$.

Таблица 1

p	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ρ'_A	0	0,0087	0,0368	0,0828	0,1477	0,2322	0,3376	0,4638	0,6139	0,7898	1
ρ_A	0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81	1
$\Delta\rho$	0	0,0012	0,0032	0,0072	0,0123	0,0178	0,0244	0,0262	0,0261	0,0202	0

Разброс значений корреляционной функции, по которым производилось усреднение на рис. 1 и 2, значительно превосходит величину ошибки используемой аппроксимации. Поэтому в дальнейшем при интерпретации экспериментальных данных используется приближенная связь между ρ_A и p в виде квадратичной зависимости.

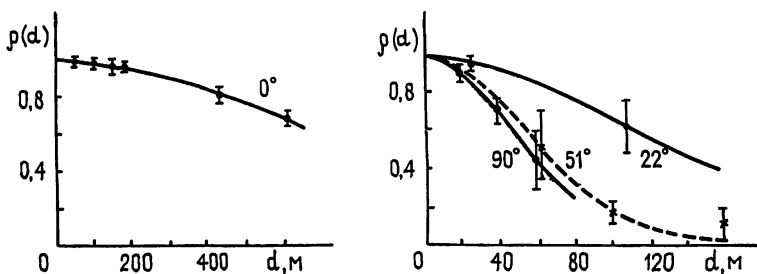


Рис. 1.

Представив согласно [6] коэффициент корреляции поля рассеянного сигнала $\rho_E = |\rho_E| e^{i\varphi}$ (где $|\rho_E|$ — модуль коэффициента корреляции поля, $e^{i\varphi}$ — фазовый множитель), получим $p^2 = \rho_E \rho_E^* = |\rho_E|^2$ и $\rho_A \approx |\rho_E|^2$. Последняя формула устанавливает приближенную зависимость между коэффициентом корреляции амплитуды огибающей сигнала A , который определяется в эксперименте, и коэффициентом корреляции поля сигнала E . При малых угловых размерах возмущенной области в сравнении с шириной диаграмм направленности используемых антенн пробного канала (что соответствует условиям эксперимента) коэффициент корреляции рассеянного поля определяется дифракционной картиной возмущенной области в месте приема, что позволяет оценить ее характерные размеры.

2. Пространственная корреляция рассеянного поля. Результаты измерений коэффициента корреляции амплитуд огибающей сигнала при пространственном разное, полученные в Астрахани в вечернее время (19—22 часа) при различных ориентациях баз, приведены на

рис. 1 вместе с 90-процентными доверительными интервалами. Экспериментальная зависимость коэффициента корреляции от размера базы может быть аппроксимирована выражением

$$\rho_A(d) = \exp[-(d/d_A)^2], \quad (4)$$

где d_A — радиус корреляции по уровню e^{-1} . Значения радиуса корреляции для различных ориентаций баз относительно направления на возмущенную область представлены в табл. 2.

Таблица 2

$A, \text{град}$	0	22	39	51	90
$d_A, \text{м}$	950	166	72	75	68
$d_E, \text{м}$	1344	235	102	105	96

Азимут $A=0^\circ$ соответствует ориентации в направлении на возмущенную область. Зависимость радиуса корреляции от азимута может быть представлена эллипсом, большая полуось которого ориентирована вдоль направления на возмущенную область и равна 950 м; малая полуось равна 68 м при поперечном масштабе неоднородностей $l_\perp = 3 \text{ м}$. В работе [7] получено, что продольный радиус корреляции в КВ и УКВ диапазонах при приеме в Волгограде превышает 450 м, что не противоречит нашим результатам. По данным [8, 9] радиус пространственной поперечной корреляции на частоте 40 МГц равен 6λ .

Отличие от наших результатов ($d_{A\perp} \sim 10\lambda$) может быть обусловлено различными геометрическими соотношениями на радиолиниях и различными размерами возмущенной области.

Модуль коэффициента корреляции рассеянного поля может быть представлен в виде

$$|\rho_E| \approx \sqrt{\rho_A} = \exp[-(1/2)(d/d_A)^2] \approx \exp[-(d/d_E)^2]. \quad (5)$$

Значения радиуса корреляции рассеянного поля $d_E \approx \sqrt{2}d_A$ при различных ориентациях баз приведены в табл. 2.

Поперечная пространственная корреляционная функция позволяет определить угловую спектральную плотность квазиплоской случайной волны [8]:

$$W(k_\perp) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{E\perp}(d_{E\perp}) \exp(ik_\perp d_{E\perp}) d(d_{E\perp}). \quad (6)$$

Для корреляционной функции (5) рассеянного поля угловой спектр $W(k_\perp) = W_0 \exp(-1/4 k_\perp^2 d_{E\perp}^2)$, полная ширина его по уровню e^{-1} равна $k_{\perp 0} = 4/d_{E\perp}$, а угловой размер рассеивающей области $\theta = k_{\perp 0}/k = 4/kd_{E\perp}$, $k = 2\pi/\lambda$. По нашим измерениям, угловой размер $\theta = 2^\circ, 5$. Такой же угловой спектр может быть получен по [10] для поперечной корреляционной функции (4) амплитудыгибающей рассеянного сигнала. Полная ширина его в этом случае равна $k_{\perp 0} = 2\sqrt{2}/d_{A\perp}$, угловой размер рассеивающей области равен также $\theta = 2^\circ, 5$.

Согласно [3, 4] радиусы пространственной корреляции рассеянного поля различны во френелевской и фраунгоферовой зонах, которые определяются соотношением линейных размеров рассеивающей области L и расстояния r от нее до пункта приема. Для средней высоты рассеяния, равной 280 км на экспериментальной радиолинии Ростов — Астрахань, величина $r = 1195 \text{ км}$. Линейный размер области рассеяния

определяется в первом приближении диаграммой направленности направленной антенны, ширина главного лепестка которой по половинной мощности равна 18° вдоль местного магнитного меридиана и 12° — поперек этого направления [7], что определяет размеры возмущенной области равными 60×90 км, т. е. $L \sim 100$ км. Расчет показывает, что в эксперименте выполняются условия промежуточной зоны: $L \ll r \ll kL^2$, в которой поперечный радиус корреляции определяется угловым размером области рассеяния, или шириной углового спектра рассеянной волны, $d_{E\perp} = 4/k\theta$ [6]. В этом соотношении радиус корреляции и угловой размер области рассеяния приведены к уровню e^{-1} , что отличает его от приведенных в [3, 4] оценок $d_{E\perp} \sim 2\pi/k\theta$. Определенный по $d_{E\perp} = 96$ м угловой размер области рассеяния $\theta = 2^\circ,5$ позволяет определить ее линейный размер в поперечном к лучу зрения направлении $L_\perp \sim 50$ км с 90-процентными доверительными границами 43—68 км. На используемых радиополосах это направление близко к восточно-западному.

Радиус пространственной корреляции на земной поверхности в направлении на область рассеяния обусловлен [4, 7] переносом на эту поверхность продольного $d'_\parallel = 4/k\theta_v^2$ и поперечного в вертикальном направлении $d'_\perp = 4/k\theta_v$ радиусов корреляции рассеянного поля и определяется меньшим из $d_{\perp B} = d'_\perp \operatorname{cosec} \Delta$ и $d_\parallel = d'_\parallel \sec \Delta$, где Δ — угол возвышения на возмущенную область, равный в наших наблюдениях 9° . Расчет $d_{\perp B}$ и d_\parallel при $\theta = 2^\circ,5$ показал, что $d_{\perp B} < d_\parallel$, следовательно, радиус продольной корреляции на земной поверхности определяется вертикальной поперечной корреляцией, поэтому $d'_\perp = 210$ м и $\theta_v = 1^\circ,1$. Расчет, выполненный с учетом угла наклона поверхности зеркального рассеяния к плоскости горизонта пункта нагрева, равного 10° , по измерениям [11], показал, что угол между этой поверхностью и направлением на нее от приемного пункта равен 9° . Поэтому размер рассеивающей области в этом направлении включает в себя как толщину области рассеяния, так и протяженность ее в продольном направлении, близком к меридиональному. Полагая сечение рассеивающего объема меридиональной плоскостью прямоугольником с высотой Δh (толщина области) и длиной L , можно получить для $\theta_v = 1^\circ,1$ соотношение $\Delta h = 22 - 0,16L$ (7). Определить по результатам данных измерений одну из этих величин (Δh или L) можно только с привлечением результатов измерения каким-либо другим способом второй величины. Используя, например, результаты измерения продольного размера L по корреляционной функции при частотном разносе (см. ниже), по которым $L \sim 60 \div 70$ км, получим, что толщина области $\Delta h \sim 12$ км. По данным работы [11], $L = 36 \div 85$ км и $\Delta h = 6 \div 15$ км, что согласуется с полученной выше зависимостью (7) между L и Δh .

3. Корреляция рассеянного поля при частотном разносе. На рис. 2 представлена зависимость коэффициента корреляции уровня огибающей рассеянного сигнала $\rho_A(\Delta f)$ от величины разноса частот, полученная в ночное время в Астрахани и Волгограде. Сравнение результатов измерения показало, что значения коэффициентов корреляции, полученные на этих пунктах, практически не отличаются, что обусловлено малым отличием геометрических параметров этих радиополос. Изменение коэффициента корреляции от разноса частот может быть аппроксимировано зависимостью

$$\rho_A(\Delta f) = \exp[-(\Delta f/\Delta f_A)^2], \quad (7)$$

где Δf_A — радиус корреляции по уровню e^{-1} . Для ночных часов радиус корреляции в среднем равен 1 кГц с 90-процентным доверительным интервалом $800-1300$ Гц. В более ранние часы (19—20 часов мск,

рис. 3) радиус корреляции несколько выше (в среднем равен $1,2 \text{ кГц}$), что намечает тенденцию к увеличению радиуса корреляции днем, как это получено в [9]. В настоящих измерениях ракурсные условия и ограниченный набор частот нагревного передатчика не позволили провести исследования корреляции в дневное время. Полученные данные для вечерних и ночных часов согласуются с результатами работы [9]. Для дневных часов в [9] радиус корреляции возрастает до 3 кГц .

Радиус корреляции рассеянного поля по уровню e^{-1} определяется [3] линейным размером L области рассеяния в направлении вектора рассеяния $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s$, близкого в нашем случае к меридиональному направлению: $\Delta f_E = c/\pi L \sin \alpha$. Здесь \mathbf{k}_0 и \mathbf{k}_s — волновые векторы излученной и рассеянной волн, α — половина угла рассеяния, или угла между векторами \mathbf{k}_0 и \mathbf{k}_s , c — скорость света. Для определенных по ионограммам с помощью десятиточечного метода [12] средних высот рассеяния, равных 270 км для приема в Волгограде и 280 км — в Астрахани, углы рассеяния равны 160 и 147° соответственно. Малое отличие углов рассеяния и средних высот рассеивающей области приводит к тому, что полученные на этих радиолиниях коэффициенты корреляции мало отличаются и результаты измерения частотной корреляции на них могут быть объединены, что и сделано на рис. 2, 3. Значения радиуса частотной корреляции рассеянного поля $\Delta f_E \approx \sqrt{2} \Delta f_A$, равного $1,4 \text{ кГц}$ в ночное время и возрастающего до $1,7 \text{ кГц}$ вечером, позволяют определить размер области L равным 70 и 58 км соответственно. Полученное значение L в этом направлении согласуется с результатами угловых измерений [11], где размер области рассеяния в плоскости большого круга, проходящей через возмущенную область и приемный пункт, равен 36 — 85 км .

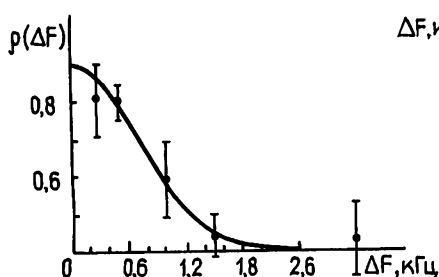


Рис. 2.

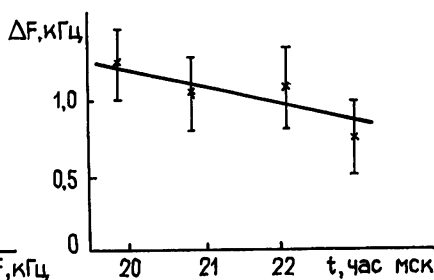


Рис. 3.

Таким образом, исследования коэффициентов корреляции при пространственном и частотном разносах позволили оценить средние размеры области рассеяния. Она представляет собой слой толщиной около 10 км , протяженностью 60 — 70 км в меридиональном и 50 км в широтном направлениях. Согласно [11] этот слой наклонен к югу под углом около 10° к горизонту. Горизонтальные размеры этого слоя меньше размеров области, вырезаемой в ионосфере диаграммой направленности нагревной антенны по половинной мощности. Видимо, не вся возмущенная область эффективно рассеивает радиоволны. Ограничение может быть обусловлено как ракурсными свойствами рассеяния, так и распределением возмущения по области.

Авторы выражают благодарность Л. М. Ерухимову за постановку задач исследований ракурсного рассеяния радиоволн и полезное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коровин А. В., Насыров А. М., Проскурин Е. В., Ягнов Н. Н.—В сб. Метеорное распространение радиоволн.—Казань: Гос. ун-т, 1981, вып. 17, с. 75.
2. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений.—М.: Наука, 1971.
3. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере.—М.: Наука, 1967.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2.—М.: Наука, 1978.
5. Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике.—М.: Сов. радио, 1960.
6. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику.—М.: Наука, 1981.
7. Фролов В. Л. Диссертация. Горький, НИРФИ, 1979.
8. Атлот В.—ТИИЭР, 1975, 63, № 7, с. 35.
9. Ваггу G. H.—Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 1025.
10. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера.—М.: Наука, 1972.
11. Коровин А. В., Насыров А. М., Проскурин Е. В., Ягнов Н. Н.—Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 6, с. 675.
12. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм.—М.: Наука, 1977.

Казанский государственный
университет

Поступила в редакцию
9 марта 1982 г.

SPACE AND FREQUENCY CORRELATION OF A FIELD SCATTERED BY SMALL-SCALE ARTIFICIAL IRREGULARITIES OF *F* IONOSPHERE REGION

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

Experimental results are presented of measurements of space and frequency correlation of envelope amplitudes of a signal scattered by artificial small-scale irregularities of *F* region, stimulated by an action of a powerful SW radiation. It is shown that in scattering by irregularities with transverse scales $L = 3$ m the radius of the space correlation in the direction to the disturbed region is equal to 1000 m, and transverse to this direction it is equal to 70 m. Experimental dependence has been obtained of the correlation coefficient on the orientation of measuring base lines relative to the direction to the disturbed region. In evening and night hours the radius of the frequency correlation is 1—1.2 KHz. The characteristic dimensions of the region of foreshortened scattering are estimated.

ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ КНИГАХ

Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме.—М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.— 25 л., ил.

В книге с единой точки зрения рассмотрены основы волновых явлений в приземной плазме (ионосфера, магнитосфера) и в плазме космического пространства (солнечная корона, межпланетная и межзвездная среда и др.). Наряду с изложением классических вопросов кинетики, электродинамики и вопросов распространения волн в плазме большое внимание уделено приложениям геофизического и астрофизического характера, а также обсуждению методов экспериментального исследования околоземного и космического пространства.

Для специалистов, проводящих исследования в области радиофизики, астрофизики, геофизики верхней атмосферы и изучения космического пространства, а также аспирантов и студентов физических, физико-технических, инженерно-физических специальностей вузов.