

УДК 537.876.23

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ С ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПЕРЕДАЧИ

О. Ю. Волков

Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

В работе приводится описание математической модели ионосферного канала связи. На её основе показана работа метода селективного возбуждения характеристических волн и результат математического моделирования работы канала.

ВВЕДЕНИЕ

Важной особенностью распространения радиоволн между точкой излучения и точкой приёма в ионосферном канале связи является возможность их прохождения по нескольким траекториям. Эта особенность обусловлена слоистостью ионосферы в целом и неоднородной структурой каждого из ионосферных слоёв в отдельности. В результате в точку приёма могут одновременно приходиться несколько волн (мод) под разными углами и с разными частотными спектрами [1].

Анизотропия ионосферы, обусловленная магнитным полем Земли, проявляется в расщеплении одной моды электромагнитной волны на два луча с различными фазовыми и групповыми скоростями, а также коэффициентами поглощения и поляризациями. Эти волны называют характеристическими волнами или магнитоионными компонентами. Их траектории отличаются в силу того, что коэффициент преломления анизотропной плазмы для них неодинаков [2].

На радиотрассах с одним отражением сигнала от ионосферы часто удаётся добиться однодогового распространения радиоволн, при этом в точку приёма приходят две характеристических волны — обыкновенная и необыкновенная. Каждая характеристическая волна распространяется по своей траектории, и поэтому эти волны имеют разные амплитуды и доплеровские сдвиги частотного спектра, что сильно влияет на качество передачи информации по ионосферному каналу связи.

В работе [3] рассмотрена вероятность ошибки при передаче дискретной информации по двухлучевому ионосферному каналу связи, а в работе [4] оценена пропускная способность такого канала. Обе величины сильно зависят от отношения мощностей характеристических волн $Q = A_{20}^2/A_{10}^2$, где A_{j0} — амплитуда детерминированной составляющей j -ой волны, $j = 1, 2$. В этих работах показано, что можно значительно повысить надёжность передачи информации по двухлучевому ионосферному каналу связи, если его параметры близки к параметрам однолучевого канала связи. Для этого необходимо снизить мощность одной из характеристических волн так, чтобы она была на $1 \div 2$ порядка меньше мощности другой волны. Этого можно достичь, например, путём специальной обработки принимаемого поля по углу прихода и/или поляризационному признаку статистическими или иными известными методами.

Особый интерес представляет относительно новый метод селективного возбуждения характеристических волн в ионосферном канале связи [5]. Его основная идея — использовать всю мощность передатчика для излучения только одной характеристической волны, которая меньше всего поглощается в ионосфере, что автоматически исключает замирание сигнала за счёт интерференции в точке приёма и значительно увеличивает отношение сигнала к шуму. Это можно

достигнуть за счёт определённого выбора поляризации волны, излучаемой передатчиком, для расчёта которой служит метод поляризационной диагностики ионосферного канала связи. Результаты экспериментальной реализации данного метода опубликованы в [6].

Похожие исследования проводились украинскими учёными [7, 8]. Авторы этих работ искали оптимальную (т. е. ту, при которой одна из характеристических волн не будет возбуждена) поляризацию излучаемого передающей антенной поля расчётно-экспериментальным способом. При этом считалось, что значение диэлектрической проницаемости ионосферы известно. Из опубликованных материалов следует, что авторам удалось реализовать селективное возбуждение характеристических волн в ионосфере на радиотрассах Харьков—Москва и Харьков—Санкт-Петербург и достичь отношения амплитуд «полезной» и «паразитной» волн, равного $16 \div 20$ дБ.

Недавно была опубликована работа, посвящённая эффективности подавления характеристических волн в зависимости от геомагнитных факторов [9]. Эксперименты проводились на трассе Магадан—Петропавловск-Камчатский. Излучаемая поляризация выбиралась опытным путём. Было установлено, что наилучшая селективность возбуждения характеристических волн достигается при спокойном электромагнитном поле Земли. При этом предполагалось, что основной причиной ухудшения селективности являлся рост мелкомасштабных неоднородностей ионосферной плазмы.

Выполнение экспериментальных исследований не отменяет проведения численного моделирования, т. к. оно позволяет выявлять зависимость эффективности метода селективного возбуждения характеристических волн от различных параметров задачи более простым способом. Для его выполнения необходимо иметь простую модель анизотропного ионосферного канала связи, учитывающую его основные особенности, известные из результатов экспериментальных исследований. К ним относятся следующие факты:

- а) амплитуда, фаза и поляризационные параметры отражённых от ионосферы характеристических волн подвержены флуктуациям [3, 10];
- б) спектры флуктуаций амплитуды и фазы поля имеют очень большие ширины от долей до десятков герц;
- в) при распространении волн в ионосферном канале связи значительную роль играет эффект Доплера, обусловленный зависимостью диэлектрической проницаемости среды от времени [10, 11];
- г) поляризационные параметры выходящей из ионосферы характеристической волны флуктуируют слабо [12], что является следствием стабилизирующего влияния магнитного поля Земли.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Представим ионосферный канал связи в виде «чёрного ящика» с тремя различными комплексными коэффициентами передачи для трёх взаимно ортогональных проекций поля $\mathbf{E}_{\text{input}}$, излучённого линейными антеннами, расположенными в передающем пункте и ориентированными вдоль осей x , y , z . В пункте приёма вышедшие из ионосферного канала связи поля принимаются системой антенн, ориентированных вдоль осей ξ , η и ζ . Если коэффициенты передачи канала описываются матрицей \mathbf{K} , то вышедшее из ионосферы векторное поле имеет вид:

$$\mathbf{E}_{\text{output}} = \mathbf{K}\mathbf{E}_{\text{input}} + \mathbf{E}_{\text{noise}}, \quad (1)$$

где $\mathbf{E}_{\text{input}}$, $\mathbf{E}_{\text{output}}$ — комплексные амплитуды электрического поля на входе и выходе ионосферного канала соответственно, \mathbf{K} — линейный оператор, $\mathbf{E}_{\text{noise}}$ — комплексная амплитуда аддитивного шумового электрического поля.

При построении модели ионосферного канала используем некоторые физические допущения: будем считать, что поглощение электромагнитных волн отсутствует; значение диэлектрической проницаемости ионосферы не зависит от мощности электромагнитной волны, распространяющейся в ионосфере; поляризационные параметры характеристических волн на выходе из ионосферы не зависят от вида поляризации волны, излучаемой передающими антеннами.

Рассмотрим процесс формирования одной характеристической волны, распространяющейся в ионосфере. Для вектора её электрического поля существует набор комплексных весовых коэффициентов, ответственных за возбуждение его компонент передающей антенной системой. Этот набор коэффициентов k_x , k_y и k_z образует вектор $\mathbf{k}^T = (k_x, k_y, k_z)$ поляризационной чувствительности характеристической волны к возбуждающему полю. В результате оператор \mathbf{K} можно представить в виде произведения двух векторов:

$$\mathbf{K} = \mathbf{F}(t)\mathbf{k}^T, \quad (2)$$

где $\mathbf{F}(t)$ — некоторая векторная функция времени, характеризующая данный ионосферный канал связи. Коэффициент передачи \mathbf{K} найдём в результате специальной процедуры поляризационной диагностики конкретной радиолинии.

Возбуждённая в ионосферном канале связи волна имеет эллиптическую поляризацию, изменяющуюся в процессе её распространения в анизотропной среде. Эта поляризация определяется углом между волновым вектором волны в данной точке траектории и направлением вектора напряжённости магнитного поля Земли. В точке выхода из ионосферы волна имеет некоторую поляризацию, называемую предельной [2].

В плоскости волнового фронта эллиптическую поляризацию поля можно представить единичным комплексным вектором

$$\mathbf{c} = a_1\mathbf{e}_1 + a_2\mathbf{e}_2, \quad (3)$$

где a_1 и a_2 — комплексные числа, причём $a_1a_1^* + a_2a_2^* = 1$; \mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_2 — ортонормированный базис, плоскость которого перпендикулярна волновому вектору данной характеристической волны. Этот базис называется сопровождающим.

Исследования показали, что отражённое от ионосферы поле одной характеристической волны можно представить с помощью двух моделей:

а) модель поля $E(t)$ со спектром, полностью смещённым относительно частоты падающей на ионосферу волны вследствие эффекта Доплера; в этом случае и детерминированная, и рассеянная компоненты поля имеют одинаковый доплеровский сдвиг частоты $\Omega(t)$;

б) модель поля $E(t)$ с не полностью смещённым вследствие эффекта Доплера спектром; в этом случае считают, что смещена только частота детерминированной компоненты, а частота рассеянной не смещена [11].

При общем рассмотрении свойств отражённой от ионосферы волны выбор модели не играет принципиальной роли. Комплексную амплитуду электрического поля выходящей из ионосферы характеристической волны представим в виде суммы следующих компонент:

$$\mathbf{E}_{\text{output}}(t) = \mathbf{E}_0(t) + \mathbf{E}_s(t) + \mathbf{E}_d(t) + \mathbf{E}_{\text{noise}}(t), \quad (4)$$

где $\mathbf{E}_0(t)$ — детерминированная компонента амплитуды поля, $\mathbf{E}_s(t)$ — рассеянная поляризованная компонента амплитуды поля, $\mathbf{E}_d(t)$ — рассеянная деполаризованная компонента, $\mathbf{E}_{\text{noise}}(t)$ — аддитивный шум.

Детерминированную компоненту амплитуды поля запишем в виде

$$\mathbf{E}_0(t) = \mathbf{c}A_0 \exp[i\Omega(t)t],$$

где \mathbf{c} — единичный вектор (3), A_0 — амплитуда, $\Omega(t)$ — доплеровский сдвиг частоты.

Для определённости выберем модель поля б). При этом доплеровское смещение частоты у рассеянной поляризованной компоненты E_s отсутствует, а поляризация компонент $\mathbf{E}_0(t)$ и $\mathbf{E}_s(t)$ одинакова. Рассеянную компоненту амплитуды поля $\mathbf{E}_s(t)$ представим в виде произведения вектора поляризации \mathbf{c} на случайную комплексную функцию $s(t)$, имеющую нормальное распределение действительной и мнимой частей (белый шум):

$$\mathbf{E}_s(t) = \mathbf{c}A_s s(t),$$

где A_s — среднее значение амплитуды рассеянной поляризованной компоненты, $\langle s(t)s^*(t) \rangle = 1$, $\langle \text{Re}[s(t)] \text{Im}[s(t)] \rangle = 0$, $\langle s(t) \rangle = 0$.

Деполаризованную (в сопровождающем базисе) компоненту амплитуды поля можно представить в виде

$$\mathbf{E}_d = A_d \mathbf{d}(t),$$

где A_d — среднее значение амплитуды деполаризованной компоненты; вектор $\mathbf{d}(t)$ определяется формулой (3) при замене комплексных постоянных a_i двумя статистически независимыми комплексными случайными величинами $b_i(t)$, имеющими нормальное распределение: $\mathbf{d}(t) = b_1(t)\mathbf{e}_1 + b_2(t)\mathbf{e}_2$, $\langle b_1(t)b_2^*(t) \rangle = 0$, $\langle b_j(t)b_j^*(t) \rangle = 1/2$, $\langle \text{Re}[b_j(t)] \text{Im}[b_j(t)] \rangle = 0$; $j = 1, 2$.

Средние мощности трёх компонент частично рассеянного и частично поляризованного поля связаны со степенью рассеяния и деполаризации волны в рамках принятой модели поля (4) следующими соотношениями:

$$\beta^2 = \frac{A_0^2}{A_s^2 + A_d^2}, \quad q = \frac{A_0^2 + A_s^2}{A_0^2 + A_s^2 + A_d^2},$$

где β^2 — степень рассеяния, а q — степень поляризации компоненты поля.

Выразим удельные мощности каждой компоненты поля через введённые параметры:

$$\frac{A_0^2}{A_0^2 + A_s^2 + A_d^2} = \frac{\beta^2}{1 + \beta^2}, \quad \frac{A_s^2}{A_0^2 + A_s^2 + A_d^2} = q - \frac{\beta^2}{1 + \beta^2}, \quad \frac{A_d^2}{A_0^2 + A_s^2 + A_d^2} = 1 - q.$$

Полученные выражения позволяют определить амплитуды компонент поля, входящих в (4). Учтём, что A_0 , A_s и A_d пропорциональны произведению $\mathbf{k}^T \mathbf{E}_{\text{input}}$. Тогда выражение (2) для характеристической волны с индексом n примет вид:

$$\mathbf{K}_n = \left\{ \mathbf{c}_n \left[\exp(i\Omega_n t) \sqrt{\frac{\beta^2}{1 + \beta^2}} + s_n(t) \sqrt{q - \frac{\beta^2}{1 + \beta^2}} \right] + \mathbf{d}_n(t) \sqrt{1 - q} \right\} \mathbf{k}_n^T, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_n &= a_{n1}\mathbf{e}_{n1} + a_{n2}\mathbf{e}_{n2}, & a_{n1}a_{n1}^* + a_{n2}a_{n2}^* &= 1; \\ \mathbf{d}_n &= b_{n1}(t)\mathbf{e}_{n1} + b_{n2}(t)\mathbf{e}_{n2}, & \langle b_{n1}(t)b_{n1}^*(t) + b_{n2}(t)b_{n2}^*(t) \rangle &= 1. \end{aligned}$$

Отметим, что оператор $\mathbf{K} = \sum_{n=1}^N \mathbf{K}_n$ следует рассматривать как поляризационно-чувствительный коэффициент передачи векторного поля по ионосферному каналу, включая передающую и приёмную антенны. Выражение (5) может быть использовано для любых характеристических волн, идущих по разным траекториям в ионосфере между пунктом передачи и приёма.

Рассмотренная модель пригодна для описания полей, однократно отражённых от ионосферы. Для двухскачковой радиоперелинии выражение (1) примет вид

$$\mathbf{E}_{\text{output}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \mathbf{K}_{nm} \mathbf{K}_n \mathbf{E}_{\text{input}} + \mathbf{E}_{\text{noise}},$$

где \mathbf{K}_n и \mathbf{K}_{nm} — линейные операторы (матрицы коэффициентов передачи ионосферного канала связи) при первом и втором отражении волны от ионосферы соответственно. При этом структура каждой матрицы такая же, как и в односкачковой модели (см. формулу (5), заменяя индекс n на набор индексов nm при рассмотрении второго скачка).

Рассуждая аналогичным образом, можно построить модели многоскачкового ионосферного канала связи с числом скачков большим двух:

$$\mathbf{E}_{\text{output}} = \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^M (\dots) \mathbf{K}_{nm} \right) \mathbf{K}_n \mathbf{E}_{\text{input}} + \mathbf{E}_{\text{noise}}.$$

2. МЕТОД СЕЛЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ИОНОСФЕРНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Покажем работу метода селективного возбуждения характеристических волн на основе математической модели ионосферного канала связи, описанной выше. Рассмотрим случай односкачковой ионосферной радиотрассы. Формула (1), определяющая поле в точке приёма, для двухлучевого ионосферного канала связи примет вид

$$\mathbf{E}_{\text{output}} = (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2) \mathbf{E}_{\text{input}} + \mathbf{E}_{\text{noise}}, \quad (6)$$

где \mathbf{K}_1 и \mathbf{K}_2 — операторы, ответственные за распространение первой и второй характеристических волн.

Каждый оператор \mathbf{K}_n можно представить в виде произведения вектора $\mathbf{F}_n(t)$ на транспонированный вектор \mathbf{k}_n , см. (2), и, используя (6), записать

$$\mathbf{E}_{\text{output}} = \left[\sum_{n=1}^2 \mathbf{F}_n(t) \mathbf{k}_n^T \right] \mathbf{E}_{\text{input}} + \mathbf{E}_{\text{noise}} = \sum_{n=1}^2 \mathbf{F}_n(t) \mathbf{k}_n^T \mathbf{E}_{\text{input}} + \mathbf{E}_{\text{noise}}. \quad (7)$$

Если в пункте передачи излучить поле $\mathbf{E}_{\text{input}}$ такое, что скалярное произведение $\mathbf{k}_n \mathbf{E}_{\text{input}} = 0$, то волна с номером n в данном ионосферном канале связи не возбудится вообще, и формула (7) примет вид

$$\mathbf{E}_{\text{output}} = \mathbf{F}_{3-n}(t) \mathbf{k}_{3-n}^T \mathbf{E}_{\text{input}} + \mathbf{E}_{\text{noise}},$$

т. е. поле в точке приёма будет однолучевым.

Разработанная нами математическая модель позволяет проводить численные эксперименты, получая зависимости качества работы метода селективного возбуждения характеристических волн от различных параметров ионосферного канала связи. Например, наличие мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации приводит к значительному снижению коэффициента рассеяния β^2 , что, в свою очередь, влияет на качество работы данного метода в таком канале. Для выяснения влияния уровня аддитивного шума и коэффициента рассеяния β^2 на работу метода селективного возбуждения характеристических волн был проведён математический эксперимент. Методика эксперимента состояла в следующем:

а) выбирались параметры ионосферного канала связи, близкие к реально встречающимся в физическом эксперименте;

б) проводилось вычисление коэффициентов, входящих в описание модели такого канала, и вычисленные параметры подставлялись в (5) для определения оператора \mathbf{K}_n ;

в) проводился сеанс поляризационной диагностики ионосферного канала связи, в котором излучались поля с известной поляризацией; длительность сеанса выбиралась равной периоду,

отвечающему доплеровскому сдвигу частоты; информация об амплитуде и фазе принятого поля обрабатывалась по определённому алгоритму: решалась задача поляризационной диагностики и вычислялись значения коэффициента поляризации излучаемой волны, позволяющие возбудить в ионосферном канале связи только одну (обыкновенную или необыкновенную) характеристическую волну [5, 6];

г) проводился сеанс селективного возбуждения характеристических волн, в котором излучалось эллиптически поляризованное электрическое поле, отношение компонент которого рассчитывалось по результатам диагностики, проводимой согласно пункту в).

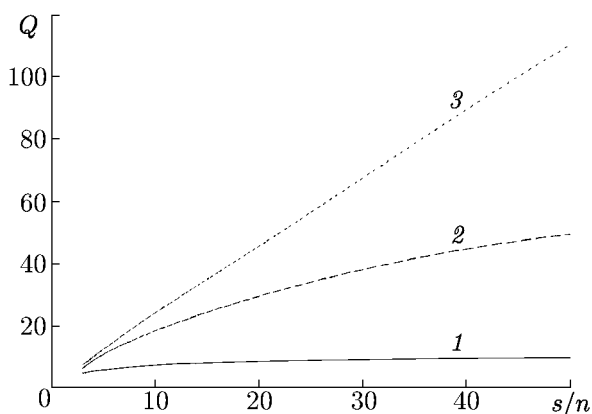


Рис. 1. Зависимость качества селективного возбуждения Q от отношения сигнал/шум $= s/n$ в ионосферном канале связи; кривые 1–3 соответствуют значениям параметра β^2 равным 10, 100 и 1 000 соответственно

ских волн определяется отношением сигнал/шум в канале связи: значение Q и значение указанного отношения приблизительно совпадают. Такая зависимость указывает на то, что данный метод практически полностью исключает возбуждение одной из двух характеристических волн: её уровень не превышает (кривая 2) или заметно ниже (кривая 3) уровня аддитивного шума.

В случае высокого рассеяния (кривая 1) качество Q слабо зависит от отношения сигнал/шум и не превышает значений β^2 . Это означает, что при высоком рассеянии радиоволн в канале связи эффективность метода селективного возбуждения характеристических волн заметно снижается.

На основе предложенной математической модели проводились и другие эксперименты, например по выявлению зависимости качества селективного возбуждения характеристических волн от времени диагностики. Выяснилось, что минимальное время диагностики составляет половину периода, отвечающего доплеровскому сдвигу частоты, и его увеличение не оказывает влияние на качество работы методов поляризационной диагностики и селективного возбуждения характеристических волн. В случае более короткого времени диагностики наблюдается заметное снижение величины Q .

ВЫВОДЫ

В работе предложена простая математическая модель поляризационно-чувствительного ионосферного канала связи, учитывающая основные особенности электромагнитного поля, выходящего из реальной ионосферы, к которым относятся его поляризационные характеристики, обусловленные анизотропией ионосферы, и доплеровский сдвиг частоты.

Результатом каждого сеанса было значение Q (качество селективного возбуждения характеристических волн), определяемое как отношение средней за сеанс мощности «возбуждаемой» характеристической волны к мощности другой характеристической волны, которую возбуждать не предполагалось. На рис. 1 изображена зависимость Q от отношения сигнал/шум по параметру β^2 ; кривые 1–3 соответствуют значениям β^2 , равным 10, 100 и 1 000 соответственно. Параметр $q = 1$, остальные параметры фиксированы, т. к. их изменение не влияет на форму полученной зависимости. Видно, что эффективность метода сильно зависит от рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации, связанного с величиной β^2 .

При малом рассеянии (кривые 2 и 3) качество селективного возбуждения характеристических волн

Предложенная модель позволяет не только продемонстрировать работу метода селективного возбуждения характеристических волн, но и проводить математическое моделирование, выявляя особенности его работы в зависимости от различных физических параметров ионосферы, что не всегда возможно в прямом физическом эксперименте. Для примера в работе рассмотрено влияние величины рассеяния радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации при различных значениях уровня шума в ионосферном канале связи. Показано, что метод селективного возбуждения характеристических волн может эффективно применяться на таких радиотрассах, для которых параметр рассеяния β^2 порядка 100 и выше. При этом энергия передатчика излучается преимущественно в виде одной характеристической волны, а уровень второй волны не превышает уровня шума в канале связи. Для радиотрасс с малыми значениями β^2 (10 и менее) применение данного метода оказывается малоэффективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дотолев В. Г., Жильцов А. У., Суханов В. И. // Электросвязь. 1990. № 9. С. 10.
2. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
3. Арефьева Л. Н., Березин Ю. В. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 1990. Т. 31, № 4. С. 34.
4. Березин Ю. В., Вылегжанин И. С. // Радиотехника. 2005. № 1. С. 6.
5. Пат. № 2002276 РФ. Способ возбуждения характеристических волн в ионосфере / Березин Ю. В., Балинов В. В., Рыжов Д. Е. Заявл. 28.04.1992; Оpubл. 30.10.1993.
6. Березин Ю. В., Волков О. Ю. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2004. Т. 2, № 1. С. 53.
7. Фалькович И. С., Калининченко Н. Н., Станиславский А. А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35, № 6. С. 123.
8. Фалькович И. С., Калининченко Н. Н. // Электросвязь. 1998. № 8. С. 21.
9. Сивоконь В. П., Дружинин Г. И. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 4. С. 521.
10. Намазов С. А., Новиков В. Д., Хмельницкий И. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 16, № 4. С. 473.
11. Балинов В. В., Березин Ю. В., Виноградов Ю. Е., Смирнов В. И. // Техника средств связи. Сер. Системы связи. 1981. № 2. С. 10.
12. Березин Ю. В., Матиясевич Н. А., Смирнов В. И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1972. Т. 12, № 5. С. 830.

Поступила в редакцию 21 декабря 2010 г.; принята в печать 29 января 2011 г.

MATHEMATICAL MODEL OF AN IONOSPHERIC COMMUNICATION CHANNEL WITH POLARIZATION-SENSITIVE TRANSMISSION COEFFICIENTS

O. Yu. Volkov

We describe a mathematical model for the ionospheric communication channel. The method of selective excitation of characteristic waves and the result of mathematical simulation of the channel operation are shown on its basis.