

A_{\max}/A_{in} резко возрастает при токе электронов более 2 А. При меньших значениях отношение A_{\max}/A_{in} слабо зависит от токов. Это связано с тем что плотность потока тормозных фотонов при токе электронов менее 1 А недостаточна для оказания заметного влияния на процессы трансмутации и временная эволюция изотопов определяется их β -распадами. Таким образом, для эффективной трансмутации ^{90}Sr , так же как и для формирования радиоактивных источников большой интенсивности, необходимо, чтобы непрерывный ток электронов был не менее 1 А.

Наблюдается увеличение эффективности трансмутации с ростом верхней границы спектра тормозного излучения. Оно обусловлено увеличением числа тормозных фотонов в области энергий 5–30 МэВ. Как видно из рис. 2, эффективность трансмутации возрастает с увеличением времени облучения, однако для верхней границы тормозного спектра 30 МэВ при токе электронов 1 А уже через 3–5 месяцев достигается максимально возможная эффективность трансмутации ^{90}Sr .

Качественно иное поведение временной зависимости отношения A_{\max}/A_{in} наблюдается при верхней границе тормозного спектра 60 МэВ и времени облучения более 5 месяцев. Величина отношения A_{\max}/A_{in} сильно возрастает с увеличением времени облучения. Это связано с накоплением короткоживущих изотопов со сравнительно небольшими периодами полураспада.

Заключение

Развитый метод описания процессов трансмутации радиоактивных изотопов под действием пучка тормозного γ -излучения может использоваться для моделирования трансмутации цепочек, содержащих элементы с массовыми числами $A > 60$, при верхних границах тормозного спектра, лежащих ниже порога рождения мезонов. Показано, что для эффективной трансмутации изотопа ^{90}Sr необходимы непрерывные токи электронов не менее нескольких ампер. Пучки тормозного γ -излучения могут быть использованы для формирования радиоактивных источников высокой интенсивности.

Литература

1. Bowman C.D. // Second Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Application, 3–7 June 1996. Kalmar, Sweden. P. 1.
2. Matsumoto T. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1988. A268. P. 234.
3. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Мокеев В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 2. С. 6 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 2.).
4. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Капитонов И.М. и др. Препринт НИИЯФ МГУ № 96-28/435. М., 1996.
5. Tuli J.K., Nuclear Wallet Cards. July 1995. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory, USA.
6. Brun R., Bruyant F., Maire M., McPherson A.C., Zanarini P. GEANT, CERN, September 1987.

Поступила в редакцию
07.04.97

РАДИОФИЗИКА

УДК 538.565.3

ЗОНЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ НА ИОНОСФЕРНЫХ ЛИНИЯХ РАДИОСВЯЗИ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В. В. Балинов, Ю. В. Березин, С. Е. Полищук, Д. Е. Рыжов

(кафедра радиофизики)

Исследованы зоны помехоустойчивого приема при селективном возбуждении характеристических волн в ионосферном канале связи. Показано, что при протяженности ионосферной радиотрассы до $16 Z_m$ площадь зоны помехоустойчивого приема оценивается величиной $S \sim 50 Z_m^2$ (при полутолщине ионосферного слоя $Z_m = 100$ км значение $S \sim 500$ тыс. кв. км). Оценка площади S выполнена для разных азимутальных углов и различной протяженности радиотрассы. Показано, что при вертикальном падении волны реализуются особо благоприятные условия для создания региональных ионосферных сетей радиосвязи с однолучевым распространением радиоволн и, следовательно, высокой надежностью передачи информации.

Амплитуда отраженной от ионосферы радиоволны испытывает глубокие замирания, которые обусловлены интерференцией обыкновенной и необыкновенной компонент, вследствие этого качество приема информации, передаваемой по ионосферному каналу связи, сильно ухудшается. Способ селективного возбуждения характеристических волн (СВХВ) в ионосфере [1] обеспечивает

распространение в ионосферном канале связи только одной характеристической волны (ХВ), например E_1 .

Учитывая физические особенности распространения радиоволн в анизотропной ионосфере, можно утверждать, что однолучевое распространение электромагнитного поля по ионосферному каналу будет реализовываться лишь для избранных точек на поверхности

Земли. При удалении точки приема от этой точки «прицеливания» в ионосфере будет возбуждаться и вторая ХВ – E_2 , мощность которой определится расхождением координат точек приема и «прицеливания».

Появление второй ХВ повлечет за собой возникновение интерференционного замирания и, как следствие, ухудшение качества приема информации, передаваемой по данной радиолинии.

Возникает вопрос: как зависит это качество приема при СВХВ в ионосфере от степени расхождения координат точек приема и «прицеливания»? Какую конфигурацию и площадь имеют области на поверхности Земли с различной помехоустойчивостью приема информации?

Для получения ответов на эти вопросы рассмотрим следующую задачу. Пусть существует линия ионосферной радиосвязи с СВХВ. Протяженность и рабочая частота этой линии могут меняться.

Введем на поверхности Земли прямоугольную систему координат, в центре которой (точка 0 на рис. 1,а) разместим излучатель электромагнитных волн с изотропной диаграммой направленности (рис. 1,а). Приемник может располагаться в любой точке поверхности Земли.

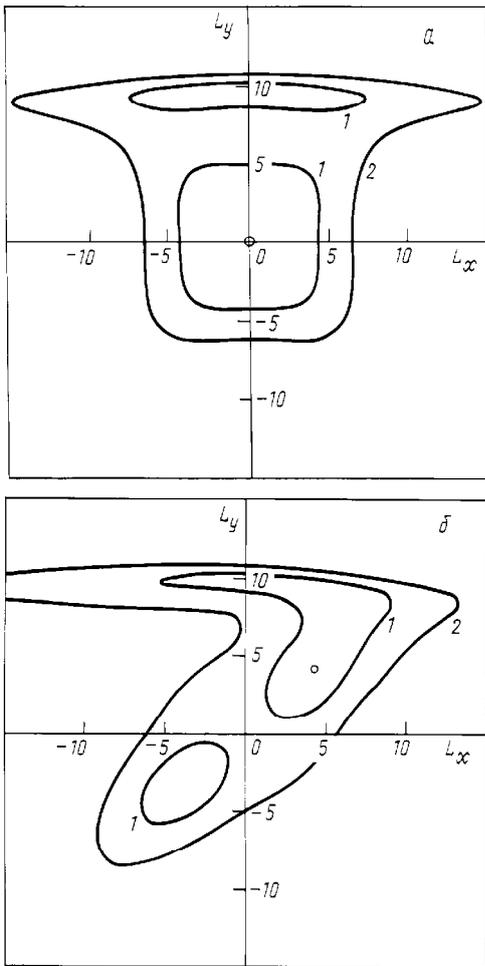


Рис. 1. Конфигурации зон помехоустойчивого приема при вертикальном (а) и наклонном ($\varphi = 45^\circ$, $L = 6 Z_m$) падении волн на ионосферу; $Q_i = 0,03$ (1) и $0,10$ (2)

Определим количественную меру селективного возбуждения ХВ как отношение их мощностей ($Q = E_2^2/E_1^2$) в любой точке на поверхности Земли. В точке наилучшего приема значение $Q = 0$, а при удалении от этой точки значение Q будет возрастать.

Целью работы является определение конфигурации и площади области S вблизи точки прицеливания, внутри которой отношение мощностей двух ХВ Q меньше заданного числа Q_i . Эту область назовем зоной помехоустойчивого приема (ПП) для данной радиотрассы.

При решении задачи используются следующие предположения.

1. Концентрация электронов в ионосфере изменяется с высотой по параболическому закону.

2. Передатчик и приемник связаны одной или двумя траекториями ХВ, а многократные отражения от ионосферы отсутствуют (рассматривается однокачковая радиотрасса).

Определение конфигурации и площади зоны ПП разбивается на несколько этапов.

Известно [2], что предельная поляризация волны, выходящей (входящей) из ионосферы, определяется углом между волновым вектором \mathbf{k} и вектором магнитного поля Земли \mathbf{H}_0 . Этот угол можно выразить через определенные параметры задачи (в частности, через угол входа волны в ионосферу ϕ_0) на основе известных формул [2, 3]. При нахождении угла ϕ_0 пренебрежем анизотропией ионосферы и используем приближение плоскостной ионосферы. В этих приближениях угол ϕ_0 находится из уравнения

$$L = \left(2h_0 + Z_m \frac{f_v}{f_c} \ln \frac{f_c + f_v}{f_c - f_v} \right) \operatorname{tg} \phi_0, \quad (1)$$

где L — длина радиотрассы, h_0 — высота начала ионосферного слоя, Z_m — полутолщина слоя, f — критическая частота, $f_v = f \cos \phi_0$, f — рабочая частота.

Анизотропию ионосферы учтем в явном виде при поиске предельной поляризации.

Для данной радиотрассы поляризацию ХВ на входе в ионосферу можно определить на основе известных соотношений [2, 3]. Задав точку приема, можно вычислить предельную поляризацию ХВ в ионосфере, а затем поляризацию, которую нужно установить на передающей антенне для обеспечения возбуждения только одной волны (что будет выполнено при совпадении поляризации излучаемой волны и предельной поляризации одной из ХВ на входе в ионосферу). Напомним, что при СВХВ в точке прицеливания присутствует только одна ХВ и поэтому для нее $Q = 0$.

Для нахождения зоны ПП изменяют координаты точки приема на поверхности Земли и для нового приемного пункта опять вычисляются две предельные поляризации ХВ. Затем волна, излучаемая передающей антенной, раскладывается по базису из двух вычисленных поляризаций, в результате чего вычисляются амплитуды каждой из двух возбуждаемых ХВ. Зоной ПП является совокупность точек приема, для которых выполняется неравенство $Q \leq Q_i$.

На рис. 1, изображены контуры зон при различных азимутальных углах φ и различной протяженности линии радиосвязи. Передатчик находится в начале координат, а точка селективного возбуждения ХВ выделена маленьким кружком. Магнитное поле Земли на рис. 1, направлено на север. При расчетах было принято, что координаты точки излучения следующие: 56° с.ш., $37,5^\circ$ в.д. (координаты Москвы). Расстояние L между точками излучения и приема выражено в единицах полутолщины Z_m ионосферного слоя: $L = gZ_m$, где g — безразмерный параметр. Высота начала ионосферного слоя h_0 была принята равной $2Z_m$, отношение рабочей частоты к критической $f/f_c = 0,9$.

Рисунок 1, соответствует вертикальному падению волны на ионосферу, а рисунок 1, — наклонному падению при азимутальном угле $\varphi = 45^\circ$ и $L = 6 Z_m$.

Конфигурации зон помехоустойчивого приема соответствуют значениям $Q_i = 0,03$ и $0,1$ (кривые 1, 2 соответственно).

Из рис. 1, видно, что зона ПП при СВХВ имеет сложную конфигурацию, зависящую от протяженности и ориентации радиотрассы относительно магнитного поля Земли и заданного отношения амплитуд ХВ Q_i . Значение параметра Q_i сильно влияет на размер зоны ПП. Так, например, для радиотрассы длиной $L = 6 Z_m$ и значения $Q_i = 0,03$ площадь зоны лежит в пределах $(15-40) Z_m^2$, а при $Q_i = 0,1$ — в пределах $(150-200) Z_m^2$ (что при $Z_m = 100$ км соответствует $L = 600$ км и $S = 150-400$ и $1500-2000$ тыс. кв. км соответственно).

Кроме основной зоны ПП появляются также дополнительные. Вопрос о физической причине появления дополнительных зон ПП требует специального рассмотрения. Однако очевидно, что при использовании всенаправленного излучения (в задаче оговорена изотропная диаграмма направленности излучателя) следует рассматривать все возможные ориентации радиотрасс.

Особого внимания заслуживает рис. 1,а, на котором изображена зона ПП при вертикальном падении волны на ионосферу ($L = 0$). Этот случай очень удобен с практической точки зрения. Во-первых, площадь зоны ПП вокруг передающего пункта относительно велика (для $Q_i = 0,03$ площадь равна $75 Z_m^2$, что при $Z_m = 100$ км составляет $S = 750$ тыс. кв. км). Во-вторых, для обеспечения двусторонней передачи данных по радиолинии с СВХВ при наклонном падении радиоволны на ионосферу поляризационную диагностику требуется провести в каждом из двух передающих пунктов, а при вертикальном падении диагностику достаточно провести в одном из них, а в другом просто использовать полученные в первом пункте результаты. Таким образом, внутри зоны ПП можно организовать (без дополнительной диагностики) региональную сеть ионосферной радиосвязи с однолучевым распространением волн, т.е. сеть с наивысшими помехоустойчивостью и скоростью передачи информации [4].

Рассмотрим зависимость площади зоны от дальности радиотрассы, когда в качестве параметра выступает азимутальный угол φ . На рис. 2 представлены два таких

графика (при значении $Q_i = 0,03$). График 1 отвечает $\varphi = 150^\circ$, а график 2 — $\varphi = 30^\circ$. Видно, что площадь зоны при малых дальностях ($L < 4 Z_m$) практически не изменяется, при $L \approx 5 Z_m$ резко падает до 1/5 первоначального значения, затем медленно растет. Резкое уменьшение площади зоны связано с тем, что одна зона, расположенная вокруг ПП (см. рис. 1), распадается на две, находящиеся по разные стороны передатчика (см. рис. 2).

Для азимутальных углов больших 90° зависимость площади зоны от дальности радиотрассы практически совпадает с кривой 1, а для углов меньших 90° график имеет характерный максимум (точка А на рис. 2). Этот максимум связан с качественным изменением конфигурации зоны ПП при изменении дальности радиотрассы.

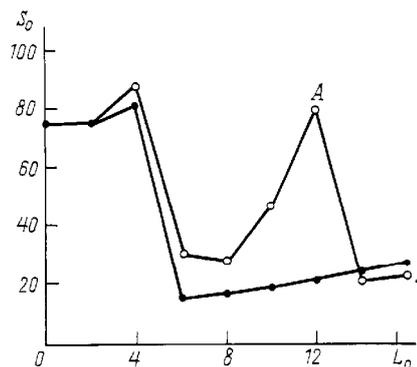


Рис. 2. Зависимость площади зоны ПП от дальности радиотрассы при различных азимутальных углах: $\varphi = 150^\circ$ (1) и 30° (2)

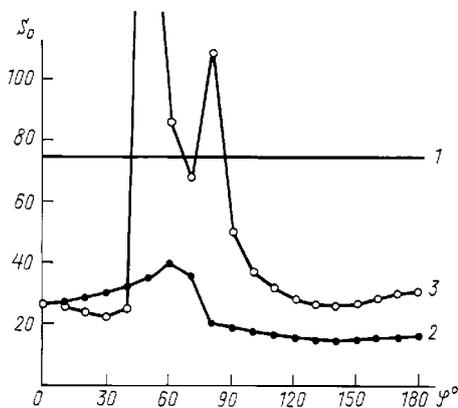


Рис. 3. Зависимость площади зоны ПП от азимутального угла при различных дальностях радиотрассы: $L = 0$ (1), $L = 6 Z_m$ (2) и $L = 16 Z_m$ (3)

Рассмотрим теперь зависимость площади зоны ПП от ориентации радиотрассы относительно магнитного поля Земли. В качестве параметра примем дальность радиотрассы L . На рис. 3 представлены два таких графика (2 и 3), полученные при значении $Q_i = 0,03$. График 2 отвечает расстоянию $L = 6 Z_m$, график 3 — $L = 16 Z_m$. Линия 1 соответствует площади зоны при нулевой дальности радиотрассы. При малых дальностях радиотрассы (порядка $2 Z_m$ и меньших) кривая $S(\varphi)$ практически не отличается от прямой линии 1. При больших расстояниях выделим следующую особенность кривой $S(\varphi)$: для азимутальных углов радиотрассы

больших 90° зависимость площади от ориентации радиолитии практически отсутствует, а для углов меньших 90° наблюдается сложная зависимость площади S от угла φ , которая в работе не анализируется.

Известно, что параметры ионосферы могут флуктуировать в некоторых пределах. Было проведено исследование зависимости конфигурации и площади зоны ПП от полутолщины ионосферного слоя (Z_m), отношения рабочей частоты к критической (f/f_c) и высоты начала ионосферы (h_0), так как суточным флуктуациям подвержены именно эти параметры. Значение Z_m выбиралось в интервале от 100 до 50 км, отношение f/f_c — от 0,9 до 0,6, h_0 — от 1,5 до 3 Z_m .

Изменение параметров ионосферы в указанных пределах сказывалось только на изменении площади зоны ПП, тогда как конфигурация зоны оставалась прежней. Ее размер практически линейно зависит от высоты h_0 и слабо зависит от параметров Z_m , f/f_c . При флуктуациях Z_m и f/f_c изменение площади зоны максимально при нулевой протяженности радиотрассы и составляет 20–30%, а при дальности радиотрассы более 500 км — менее 10%.

В целом полученные результаты свидетельствуют о следующем.

1. Ионосферные линии радиосвязи с селективным возбуждением ХВ обеспечивают создание на поверхности Земли зон приема с высокой помехоустойчивостью, площадь которых может достигать нескольких сотен тысяч квадратных километров.

2. Зоны ПП не имеют простой конфигурации (например, круг, многоугольник, эллипс) и не могут быть описаны простыми формулами.

3. Конфигурация зоны зависит явно от двух параметров: дальности радиотрассы и ее ориентации относительно плоскости магнитного меридиана Земли.

4. Конфигурация и площадь зоны ПП слабо зависят от флуктуаций полутолщины ионосферного слоя и отношения рабочей частоты к критической, но сильно зависят от высоты начала ионосферного слоя.

Особый интерес представляет зона ПП при вертикальном падении волны на ионосферу, так как внутри нее можно организовать (без дополнительной диагностики) региональную сеть ионосферной радиосвязи с однолучевым распространением волн.

Таким образом, метод СВХВ позволяет создавать на поверхности Земли весьма значительные по площади зоны, внутри которых обеспечивается прием только одного луча отраженной от ионосферы волны, т.е. создавать однолучевой ионосферный канал радиосвязи, который является оптимальным по критерию качества передачи информации [4].

Литература

1. Березин Ю.В., Рыжов Д.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. № 2, С. 93 (Moscow University Phys. Bull. 1992. No. 2. P. 87).
2. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., 1967.
3. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М., 1960.
4. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М., 1970.

Поступила в редакцию
11.04.97