

УДК 621.391:523.164

АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ОБЪЕКТОВ СКВОЗЬ ТУРБУЛЕНТНУЮ АТМОСФЕРУ

В. Н. Уваров

Рассмотрен метод апертурного синтеза, обеспечивающий безабберационный прием изображений некогерентных объектов сквозь турбулентную атмосферу. Метод базируется на однородности исходной функции когерентности в дальней зоне, соотношении «замкнутых фаз» и представлении исходной избыточной апертуры в виде согласованной системы безыбыточных разреженных апертур.

В современной практике наблюдений небесных объектов с поверхности Земли основным препятствием в получении изображений с предельным разрешением является турбулентность земной атмосферы. Известные методы преодоления атмосферного барьера разрешения [1] основаны на предположении о неизменяемости вида объекта в течение времени наблюдения. Для объектов, меняющих свой вид, возможно восстановление изображения с помощью статистических методов по набору короткоэкспозиционных изображений, зарегистрированных с помощью набора одинаковых телескопов в один момент времени. Практически такой путь недоступен из-за отсутствия инструментальной базы. Однако это не означает отсутствия принципиально иных путей восстановления. Один из них — это рациональное использование избыточности апертуры, одной из основных характеристик изображающей системы, определяющей число параллельных каналов приема одинаковой пространственно-частотной информации (число двухапертурных интерферометров с равной базой, которые можно выделить на исходной апертуре). В безабберационной системе избыточность повышает отношение сигнал-шум, поскольку происходит синфазное дорегистрационное суммирование сигнала. Наличие фазовых возмущений, обусловленных флуктуациями среды распространения или аберрациями системы, приводит к потере пространственной информации в высокочастотной области из-за несинфазного сложения систем интерференционных полос от избыточных интерферометров.

Известно, что прием с разреженной безыбыточной апертурой, представляющей собой набор одинаковых неравноотстоящих отверстий в непрозрачном экране на апертуре, размер которых меньше радиуса корреляции фазовых неоднородностей, обеспечивает сохранение амплитудной информации [2]. Получение наиболее вероятного неискаженного изображения по результатам такой регистрации возможно несколькими способами, связанными с решением фурье-фазовой проблемы [3, 4], которые, однако, слабо разработаны. Кроме того, эффективная площадь безыбыточной апертуры составляет малую часть исходной апертуры, а оптическая передаточная функция имеет островной характер. В результате часть информации, пропускаемой полной апертурой, оказывается недоступной для безыбыточной. Поэтому для получения информации в диапазоне полной апертуры нужно выполнить несколько регистраций с безыбыточными апертурами различных конфигураций. Громоздкость регистрации и сложность послерегистрационной обработки, видимо, являются основными препятствиями на пути практического использования безыбыточных апертур для видения сквозь атмосферу.

Рогстедом был предложен [5], а затем Родсом и Гудменом [6] развит метод использования безызыточных апертур с послерегистрационным восстановлением фазовой структуры неискаженного изображения на базе соотношения Дженисона для «замкнутых фаз» и однородности функции когерентности невозмущенного поля. Привлекательной особенностью этого метода является возможность непосредственной реставрации фазовой структуры фурье-спектра изображения. Вместе с тем этот метод использует последовательную регистрацию через различные безызыточные апертуры, что не позволяет применять его для восстановления объектов, динамично меняющих свой вид.

В данной работе изложена модификация метода Рогстеда—Родса—Гудмена, использующая параллельную регистрацию через различные безызыточные апертуры. Это оказывается возможным при рациональном использовании избыточности исходной апертуры специальным устройством — анализатором, который осуществляет кодирование исходной апертуры, заключающееся в выделении системы безызыточных взаимовложенных апертур, и разведение сформированных световых потоков для устранения взаимных помех. При этом исходная изображающая система превращается в систему взаимовложенных изображающих систем с равными фокусами и смещенными друг относительно друга оптическими осями. Каждая безызыточная апертура одной подсистемы представляет собой набор идентичных отверстий — суб-апертур, взаимное расположение которых в пределах апертуры подсистемы не повторяется. Причем объединение безызыточных апертур всех подсистем совпадает с исходной избыточной апертурой.

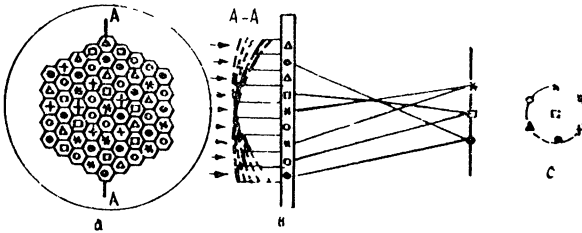


Рис. 1.

Сказанное можно пояснить примером устройства, изображенного на рис. 1. Здесь апертура анализатора является объединением семи безызыточных разреженных апертур. Каждая из подсистем имеет объектив в виде набора внеосевых линз с общей оптической поверхностью (блоков, вырезанных из одной линзы). Оптические оси линз поступательно смещены друг относительно друга так, что в фокальной плоскости формируются неперекрывающиеся изображения. В результате этого точечный объект на оси системы изображается в виде семи парциальных изображений, обладающих наилучшим отношением сигнал-шум при данном уровне светового поля на детекторе. Совокупность отдельных изображений содержит всю информацию, необходимую для реконструкции фазовой структуры фурье-спектра изображения. Пространственные спектры изображений различны и удовлетворяют условиям согласования, благодаря которым система уравнений относительно невозмущенных значений фаз разрешима с точностью до линейной функции пространственной частоты. Это соответствует в пространстве изображений смещению изображения в целом.

Для восстановления фазовой структуры изображения безызыточные апертуры должны удовлетворять следующим условиям.

Условия безызыточности, обеспечивающие формирование парциальных изображений, в которых сведены к минимуму потери амплитудной и фазовой информации, связанные с усредняющим действием избыточной апертуры при наличии aberrаций системы или среды распространения.

а) Векторный интервал взаимных расположений $r_{mn}^{\alpha} = m^{\alpha} - n^{\alpha}$, соединяющий геометрические центры субапертур m^{α} и n^{α} , не повторяется в наборе интервалов взаиморасположений субапертур одной изображающей подсистемы α ,

$$r_{mn}^{\alpha} \neq r_{pq}^{\alpha}. \quad (1)$$

Это условие обеспечивает в каждом изображении не более одного измерения компоненты фурье-изображения.

б) Модуль разности любых двух векторных интервалов одной изображающей подсистемы не меньше двух диаметров субапертуры d ,

$$|r_{mn}^{\alpha} - r_{pq}^{\alpha}| > 2d. \quad (2)$$

Это условие устраняется наложением краев соседних частотных окон.

в) Размер субапертур d не превосходит радиуса корреляции фазовых неоднородностей атмосферы r_0 ,

$$d < r_0. \quad (3)$$

Это условие устраняет усредняющее действие субапертуры.

Условие согласования, позволяющее использовать однородность функции когерентности в дальней зоне (зависимость фазы невозмущенной функции когерентности только от взаимного расположения, а не от локализации пар точек измерения). Это условие позволяет приравнять значения невозмущенных фаз компонент Фурье, измеряемых с помощью физического разных интерферометров с равной базой. Использование этого условия совместно с уравнением Дженисона для «замкнутых фаз» формализуется в виде следующего условия, накладываемого на векторные интервалы взаимных расположений (базы интерферометров): любой векторный интервал взаимных расположений субапертур подсистемы α является векторной суммой интервалов взаиморасположения субапертур данной подсистемы, повторяющихся в других подсистемах:

$$r_{mn}^{\alpha} = r_{mp}^{\alpha} + r_{pq}^{\alpha} + \dots + r_{kr}^{\alpha} + r_{rn}^{\alpha}, \quad (4)$$

где любой интервал правой части равен какому-либо интервалу другой подсистемы, $r_{pq}^{\alpha} = r_{st}^{\gamma}$.

Использование этого условия необходимо при расчете согласованной системы безыбыточных апертур, но не гарантирует однозначного расчета анализатора. Для однозначности расчета необходимо наложить дополнительные условия. В зависимости от этих условий оказывается предпочтительным тот или иной метод расчета. Простейшим и наименее эффективным является метод проб и ошибок, использовавшийся в работе Родса и Гудмена [6]. Однако он требует большого объема вычислений на ЭВМ и не позволяет сделать каких-либо оценок параметров рассчитываемой системы. Метод расчета, основанный на свойствах целочисленных разностных множеств [7], позволяет аналитически построить безыбыточные апертуры с максимально возможным числом субапертур. В настоящей работе использовался метод последовательного заполнения апертурной и частотной областей, обладающий значительной гибкостью, позволяющий учитывать разнообразные условия и одинаково эффективный при разных формах исходной апертуры. Последняя предполагается разбитой на субапертуры квадратной или правильной шестиугольной формы. Центры субапертур в этом случае являются узлами правильной двумерной прямоугольной или гексагональной решетки, заполняющей апертуру. Поскольку исходная избыточная апертура разбивается на взаимовложенные безыбыточные согласованные апертуры подсистем, расчет кодирования апертуры включает в себя расчет совокупности апертур, на которые наложены условия согласования.

Расчет отдельной маски состоит из ряда шагов, на каждом из которых происходит включение в маску одного узла и продолжается до

тѣх пор, пока на апертуре не исчерпаются разрешенные узлы. Метод расчета основан на выделении из общего числа узлов разрешенных, запрещенных и включенных. К числу запрещенных узлов относятся такие, включение которых в данную маску приводит к нарушению избыточности. Включенный — это узел, который относится к уже частично построенной маске. Расчет маски состоит в одновременном нахождении области координат узлов и области разностей координат, которая с точностью до масштабного множителя совпадает с областью частот пропускания маски, рассматриваемой как пространственно-частотный фильтр. Используя данные координатной и разностной областей, нетрудно выделить из числа узлов полной апертуры разрешенные узлы, отделив их от запрещенных и включенных. Запрещенными будут узлы, расположенные от каждого включенного узла данной маски на расстояниях, равных разностям координат узлов, присутствующих в данной маске. Очевидно, что разрешенными будут узлы, не относящиеся к числу включенных и запрещенных. Среди этих узлов можно выбрать для включения очередной узел в соответствии с условием согласования и дополнительными условиями, определяемыми стратегией расчета. После включения узла необходимо вычислить разностную область вновь включенной маски для последующего расчета. Последовательность включения узлов и пространственных частот при расчете анализатора представляет собой граф расчета анализатора.

Независимое использование отдельных безыбыточных апертур для регистрации изображений хотя и сохраняет максимальное количество информации светового поля, прошедшего сквозь атмосферу, однако не обеспечивает восстановление фазовой структуры. Для восстановления необходимо знать код, по которому было проведено дорегистрационное кодирование светового потока. В простейшем случае этот код содержится в графе расчета апертурного анализатора. Последовательное согласование фазы вдоль графа позволяет восстановить фазовую структуру.

Возможность использования одной кодированной апертуры для формирования набора парциальных изображений может быть обеспечена путем разведения парциальных изображений, формируемых безыбыточными апертурами, несколькими способами, к числу которых относятся

— разведение с помощью составной зеркальной или линзовой системы (см. рис. 1),

— разведение с помощью перископической системы типа звездного интерферометра Майкельсона,

— разведение с помощью дисперсионных систем.

Анализаторы линзового и зеркального типа предназначены для использования во вторичном зрачке существующих телескопов большого диаметра. В качестве зеркального анализатора может быть использован зеркальный телескоп с многоэлементным зеркалом при соответствующем изменении положения и ориентировки элементов главного зеркала. Перископический анализатор обладает более высокой разрешающей способностью по сравнению с используемым исходным телескопом благодаря использованию больших баз в коллекторной системе зеркал. Кроме того, в этом анализаторе возможно применение нескольких телескопов малого диаметра, установленных на общей монтировке, что позволяет надеяться на меньшую стоимость такого анализатора по сравнению с телескопом полной апертуры с равным разрешением. Дисперсионный анализатор может быть использован с окулярной камерой для получения информации в наборе спектральных полос и восстановления в них неискаженных изображений.

Послерегистрационная обработка состоит из следующих этапов: фурье-преобразование зарегистрированных парциальных изображений и выделение фазовой структуры; составление и решение системы уравнений относительно невозмущенных значений фаз и формирование фазовой структуры фурье-образа неискаженного изображения; форми-

рование амплитудной части полного фурье-образа и выполнение обратного преобразования для получения реконструированного изображения.

Наиболее ответственным этапом здесь является операция решения уравнений относительно невозмущенных фаз. Особенностью решения этой системы является неоднозначность, обусловленная циклическостью фазы и большой величиной фазовых возмущений в типичном случае превосходящих 2π . Для устранения неоднозначности систему надо решать методом последовательных исключений с коррекцией фазы на каждом шаге вычислений, что сводится к подбору константы, кратной 2π , добавление которой приводит вычисляемую фазу в главный период. Последовательное нахождение фаз осуществляется вдоль графа решений, одним из которых может быть граф расчета апертурного анализатора. Следует отметить, что восстановление фазовой структуры таким методом нечувствительно к наличию нулевых контуров в частотной области (в отличие от метода Нокса—Томпсона), поскольку позволяет выбрать граф восстановления фазовой структуры с достаточно большим значением амплитуды в узлах согласования.

Сравнение изложенного метода с методом спекл-интерферометрии показывает лучшее отношение сигнал-шум в области высоких пространственных частот, где выполняется условие

$$\tau(f) < N_A/N_\Sigma. \quad (5)$$

Здесь $\tau(f)$ — теоретическая оптическая передаточная функция дифракционно-ограниченного телескопа, N_A — число областей фазовой корреляции в пределах исходной апертуры, N_Σ — число субапертур на исходной апертуре. Этот результат можно понять, если учесть, что при регистрации с полной апертурой происходит перераспределение энергии в область низких пространственных частот [8], обусловленное несинфазностью сложения систем интерференционных полос от статистически независимых интерферометров с одинаковой базой, которые можно выделить на исходной апертуре. Кодированная исходная апертура и независимая регистрация предотвращают потерю энергии высокочастотной области, обеспечивая в результате лучшее разрешение.

Поскольку отношение сигнал-шум пропорционально площади субапертуры, понятно желание увеличить размер субапертур анализатора. Однако начиная с какого-то размера оказывается неверным предположение об аппроксимации константой фазового возмущения на одной субапертуре. При более точной аппроксимации появляются дополнительные неизвестные. В частности, при линейной аппроксимации в число неизвестных входят кроме фазовых набегов еще и значения углов локального наклона фазового фронта на каждой субапертуре. При этом усложняются условия согласования и алгоритм послерегистрационной реконструкции фазовой структуры. Вместе с тем использование этих усложненных условий согласования позволяет использовать «замыкание амплитуд» [9] для устранения амплитудных возмущений отдельных фурье-компонент.

Численное моделирование изложенного метода показало хорошие результаты. Моделирование проводилось с использованием информационного кадра, содержащего 64×64 элемента изображения. Моделируемый анализатор содержал 8×8 субапертур. Фазовый экран, моделирующий турбулентную атмосферу, возмущал фазу поля на случайную величину, постоянную в пределах субапертуры, с дисперсией, изменяющейся в диапазоне от $\pi/8$ до 2π . Результаты моделирования представлены на рисунках. На рис. 2 изображен тестовый объект. На рис. 3 приведено модельное изображение исходного объекта, наблюдаемого через турбулентную атмосферу при дисперсии фазы 2π , на рис. 4 — одно из парциальных изображений, на рис. 5 — результаты восстановления. Поскольку суммарная апертурная функция анализатора содержит зоны непрозрачности, являющиеся границами субапертур, оптическая передаточная функция имеет островной характер.

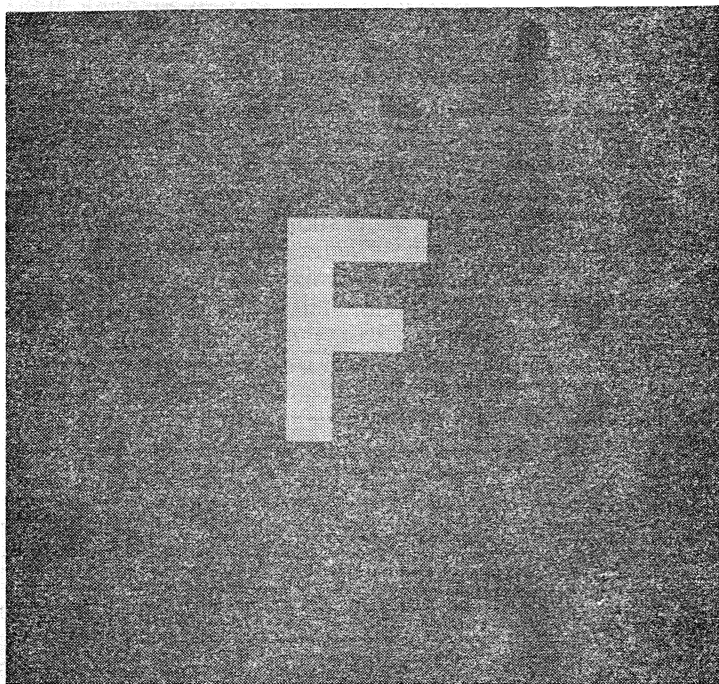


Рис. 2.

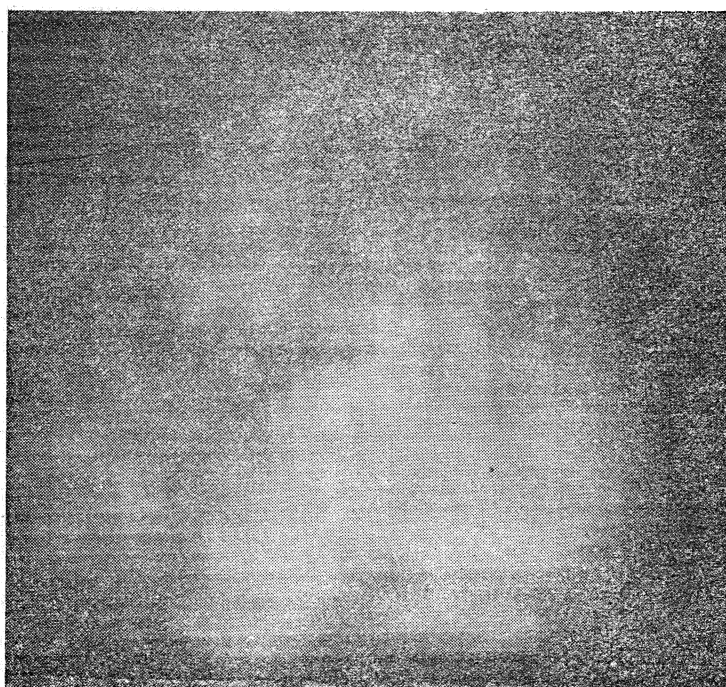


Рис. 3.

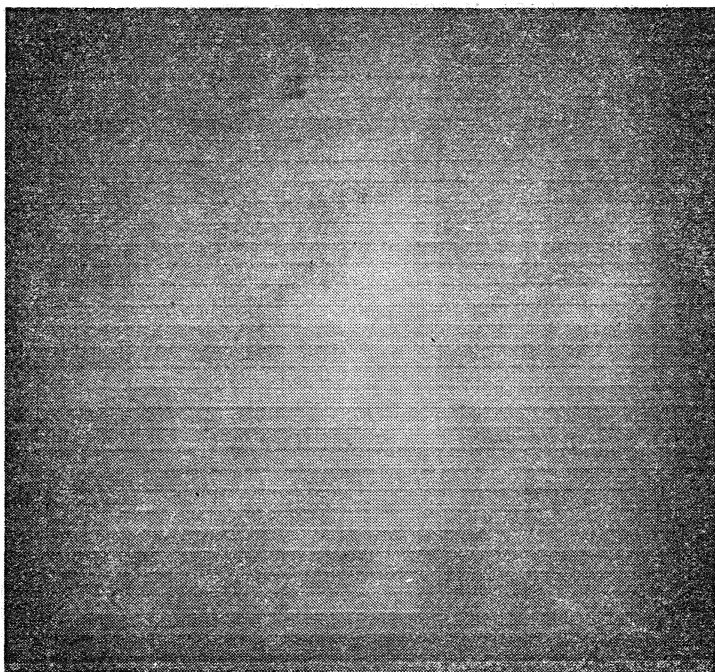


Рис. 4.

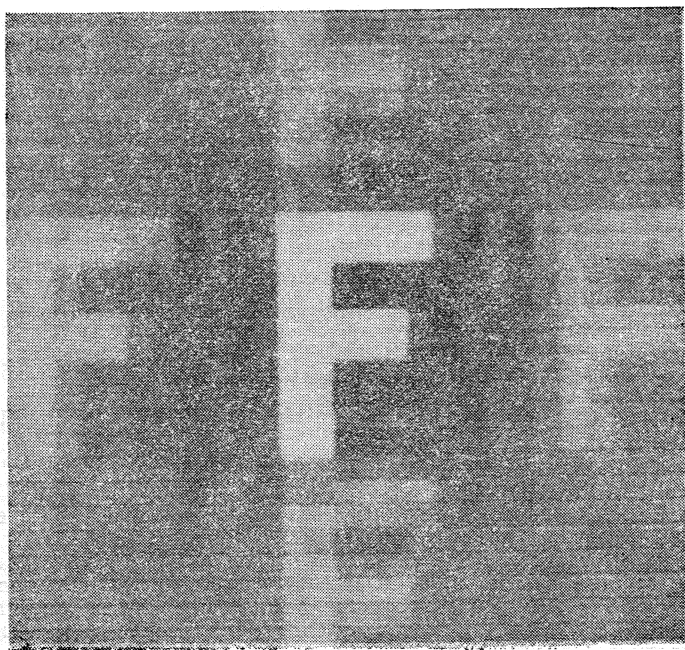


Рис. 5.

Совместное воздействие решетки непрозрачности анализатора и дискретизации изображения при послерегистрационной обработке проявилось в синтезированном изображении в виде ложных изображений объекта ненулевого порядка, устранение которых возможно при учете оптической передаточной функции метода.

К числу достоинств метода следует отнести возможность реконструкции неискаженного изображения по результатам одной экспозиции при отсутствии априорной информации и ограничений на протяженность объекта. Наиболее целесообразно применение метода при наблюдении ярких объектов, динамично меняющих свой вид. Вместе с тем не исключается возможность работы в режиме накопления сигнала по результатам нескольких экспозиций для объектов неизменно-го вида.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакут П. А., Устинов Н. Д., Троицкий И. Н., Свиридов К. Н. — Зарубежная радиоэлектроника, 1976, № 7, с. 15.
2. Russel F. D., Goodman J. W. — J. Opt. Soc. Am., 1971, 61, № 2, p. 182.
3. Brown T. M. — J. Opt. Soc. Am., 1978, 68, № 7, p. 883.
4. Бакут П. А., Троицкий И. Н., Сафронов А. Н., Демин А. А. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, № 11, с. 3.
5. Rogstad D. H. — Appl. Opt., 1968, 7, p. 585.
6. Rhodes W. T., Goodman J. W. — J. Opt. Soc. Am., 1973, 63, № 6, p. 647.
7. Копилов Л. Е. — ДАН УССР, А, 1983, № 10, с. 55.
8. Korf D. — J. Opt. Soc. Am., 1973, 63, № 8, p. 971.
9. Бычинский В. И., Уваров В. Н. — Вестник Харьк. ун-та, 1985, № 278, с. 29.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
25 февраля 1986 г.

INCOHERENT OBJECTS APERTURE SYNTHESIS THROUGH TURBULENT ATMOSPHERE

V. N. Uvarov

An aperture synthesis technique providing aberrationless reception of incoherent images through the turbulent atmosphere has been considered. The technique is based on the uniformity of the coherence function in the far field, «closure phase» conjunction and presentation of the united aperture in a form of a matched system of nonredundant rarefield apertures.

Аннотации депонированных статей

УДК 538 57:621.372 8

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ, НАПРАВЛЯЕМЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ

А. Г. Глущенко

Рассматриваются волноведущие свойства диэлектрического слоя с кубической нелинейностью, расположенного между средами, описываемыми в общем случае тензорами входных импедансов. Решение ищется в виде эллиптических функций. Рассмотрены трансцендентные уравнения, описывающие дисперсионные свойства структуры, рассмотрен частный случай прямоугольного волновода с нелинейным диэлектриком. Получены расчетные соотношения для определения предельного уровня мощности направляемых волн в зависимости от индекса волн, направляемых структурой. Показано, что наличие нелинейности приводит к возможности существования двух волн с одинаковым индексом, отличающихся структурой поля.

Статья депонирована в ВИНТИ,
рег. № 8147—В 87. Деп. от 19 ноября 1987 г.