

ПАРАМЕТРЫ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА НА НИЖНЕМ УЧАСТКЕ ТРАССЫ БИСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗ

Введение

Создание систем радиоакустического зондирования (РАЗ) атмосферы по бистатической схеме обусловлено рядом причин. К ним относятся технические сложности совмещения приемной и передающей радиоантенн (РА) и акустического излучателя (АИ) и принципиальные проблемы, возникающие при создании систем компенсации ветрового сдвига [1]. Однако у систем РАЗ, созданных по бистатической схеме, сложно получить информацию с нижнего участка трассы зондирования. Это, в частности, не позволяет сопоставить высотные метеоданные с данными, полученными с приземных метеодатчиков или невысоких метеомачт. Проблема выделения информации в значительной степени обусловлена громоздкостью аналитического решения задачи дифракции электромагнитных волн на искусственном отражателе, созданном посылкой акустических волн, и вычислительными трудностями при попытках численного решения. Это не позволяет с необходимой точностью получить связь между параметрами принятого сигнала и состоянием атмосферы на нижнем участке трассы зондирования.

Поэтому, несмотря на свою актуальность и принципиальную возможность аналитического представления, данная задача до настоящего времени не имеет решения [2].

Условия решения задачи

Схема решения дифракционной задачи представлена на рис.1, а,б.

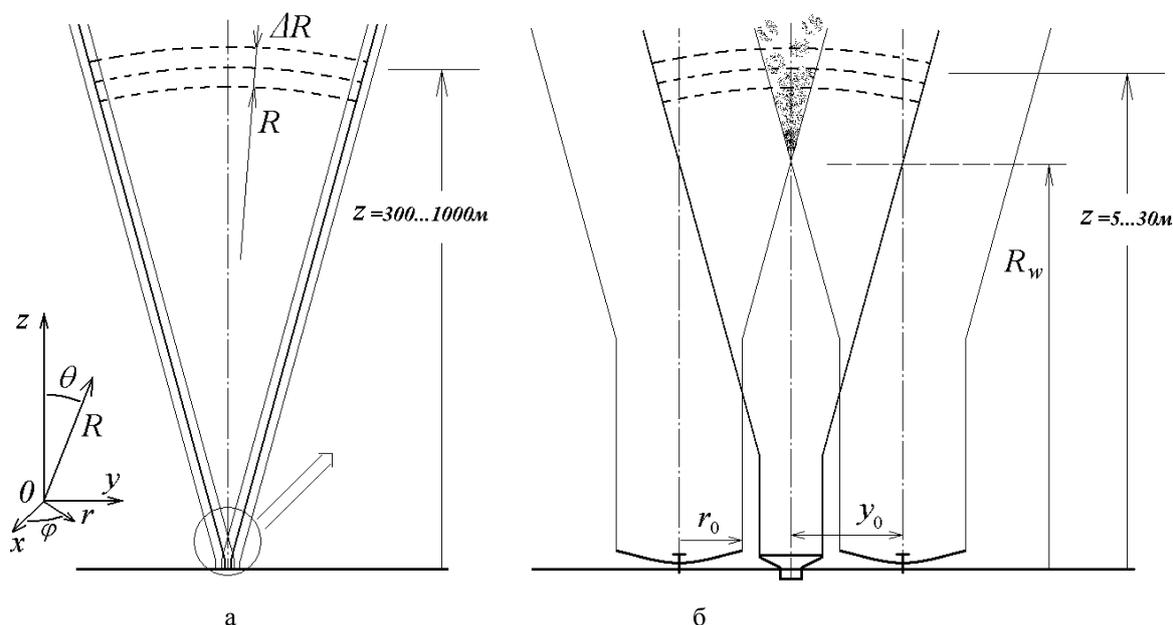


Рис. 1. Сравнение условий решения дифракционной задачи бистатического РАЗ

На рис.1, а условия решения показаны в масштабе зоны, в которой можно применить моностатическое приближение. Принципиальные свойства сигнала в этой зоне показаны в [3], полное решение задачи для реальных апертурных антенн представлено в [4]. Границы основных потоков мощности (ОПМ) акустического и электромагнитного поля, направления движения фазовых фронтов в этом случае практически совпадают, поэтому отличие от решения для моностатической системы состоит только в смещении центра фокусировки

отраженного электромагнитного поля в точку, расположенную симметрично передающей РА, относительно АИ. В бистатической зоне (рис.1, б) условия решения этой задачи принципиально иные. В этом случае структура отраженного электромагнитного поля в области приемной РА претерпевает существенные изменения.

Анализ физических факторов изменения параметров сигнала

Условия решения задачи определяются возможностями реальных систем зондирования. В системах РАЗ используются апертурные антенны, антенны бегущих волн не применяют из-за их значительной длины. Минимальная высота, с которой можно получить сигнал (точка R_W на рис.1, б), определяется шириной ОПМ РА, расстоянием между антеннами y_0 и чувствительностью приемной аппаратуры. В общем случае при увеличении чувствительности аппаратуры можно получить сигнал при перекрытии боковых лепестков диаграмм направленности (ДН) обеих РА. Можно также уменьшить высоту точки соприкосновения R_W , наклонив ДН обеих РА к центру системы, но наклон ДН ухудшит условия получения сигнала на расстояниях моностатической зоны (рис.1, а). Таким образом, в постановке дифракционной задачи уменьшение высоты R_W может быть за счет уменьшения y_0 , которое, при обычных технических решениях, нельзя сделать меньше размеров апертур.

Основные факторы, которые влияют на параметры сигнала в нижнем участке, – изменение угла между направлениями движения фазовых фронтов акустического и ЭМП, коэффициента отражения и интенсивности ЭМП. Это приводит к изменениям условия Брэгга, фазы отраженного поля и ее производной по времени при движении зондирующего пакета и внутри его объема. Частично влияние последнего фактора можно уменьшить, укорачивая зондирующую посылку. Далее будут рассматриваться только короткие пакеты и при выполненном условии согласования длин волн акустического λ_a и электромагнитного поля λ_e в дальней зоне.

Согласно оценке [5] при согласовании ДН АИ и обеих РА в дальней зоне и при минимальном для этого случая y_0 , точка соприкосновения будет находиться на ближней границе зоны Френеля РА. Таким образом, еще одним фактором, влияющим на параметры сигнала, является продолжение процесса формирования ДН РА и АИ.

Обоснование упрощений и описание последовательности решения

Как показано в [4], при решении дифракционной задачи РАЗ необходимо сохранить структуру поля как в объеме рассеяния, так и области приема. В частности, даже незначительные ошибки приводят к неправильной интерпретации фазовых соотношений, что в свою очередь влечет ошибки при определении доплеровского сдвига частоты f_D принятого сигнала, а значит к ошибкам при измерении температуры. Поэтому для решения в ближней зоне естественно использовать разложение полей по пространственным гармоникам. Однако подобный путь уже на первых этапах приводит к крайне громоздким выкладкам [6].

В [7] показано, что взаимодействие полей начинается в зоне Френеля РА и АИ, и решение может быть основано на использовании функции Грина точечного источника в свободном пространстве. Этот путь проще, но, тем не менее, и для его реализации мощности современных компьютеров недостаточно. Поэтому потребовалась дальнейшая аппроксимация пространственных распределений акустического и электромагнитного полей элементарными функциями.

Как показал численный эксперимент, традиционные представления поля антенн в зоне Френеля при решении задачи РАЗ требуют обоснования. В самом деле, погрешность оценки f_D в 1 % при нормальных условиях приводит к погрешности определения температуры в 6⁰С. Поэтому на первом этапе потребовалось дополнительное сопоставление с результатами, полученными на основании разложения полей по пространственным гармоникам. На следующем этапе определялись аппроксимирующие функции волновых полей. Ограничен-

ный объем статьи не позволяет дать подробное описание этого трудоемкого процесса, можно указать, что аппроксимация проводилась на основании физических представлений. Таким образом, в алгоритме вычислений сохранилось только интегрирование по объему, занятому зондирующей акустической посылкой.

Данную аппроксимацию можно провести только для конкретных видов распределений функций возбуждения апертур. В качестве радиоантенн в современных системах РАЗ наиболее часто применяют круглые зеркальные антенны с параболическим отражателем. Акустические излучатели представляют собой квадратную решетку пьезоэлектрических или электродинамических преобразователей. Поэтому расчет проводился для РА с круглой апертурой, интенсивность возбуждения которой описывалась квадратичной функцией, а фаза возбуждения считалась постоянной. Возбуждение АИ по раскрыву и фаза поля в его апертуре считались постоянными, но для упрощения расчетов апертура АИ также выбрана круглой. Не рассматривалось и прямое просачивание сигнала из передающей в приемную РА.

Анализ результатов

Анализ результатов проводился в соответствии с целью работы - обоснованием принципиальной возможности вычисления поведения доплеровского сдвига частоты и амплитуды принимаемого сигнала в бистатической зоне.

Радиусы апертур АИ и РА выбраны равными соответственно $r_{0a} = 5\lambda_a$ и $r_{0e} = 5\lambda_e$. Расчет проводился при условии согласования ширины ДН всех антенн и при выполнении условия Брэгга в дальней зоне, а также минимального расстояния между РА, которое определяется техническими возможностями. Поэтому выбрано $y_0 = 1,8r_{0e}$.

Амплитудные и фазовые распределения полей круглых апертур с равномерным и квадратичным возбуждением в зависимости от расстояния показаны на рис.2.

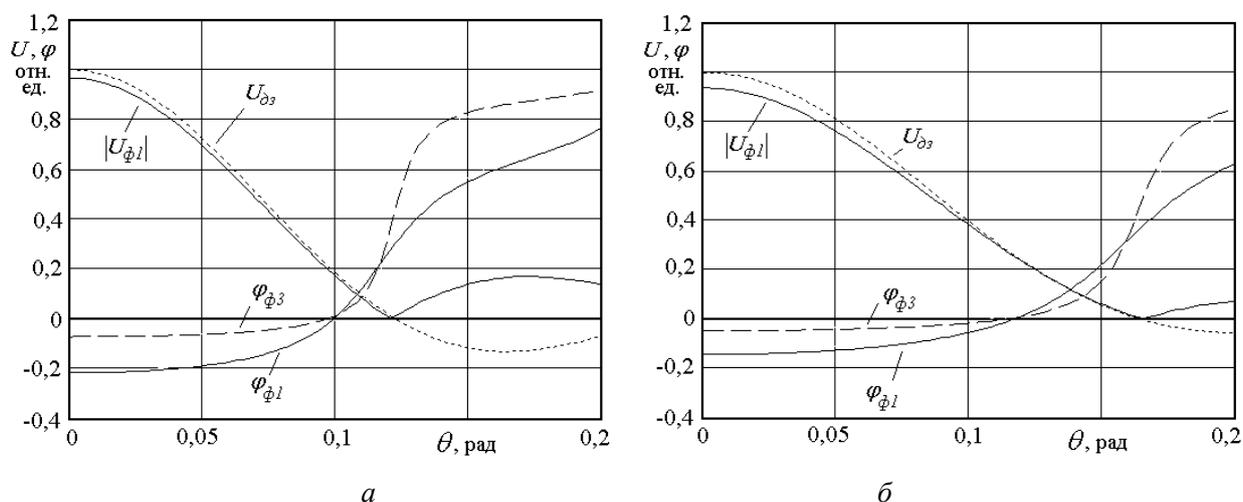


Рис. 2. Распределение амплитуды и фазы полей при равномерном (а) и квадратичном (б) возбуждении апертур, $U_{\Delta 3}$ – поле в дальней зоне, $|U_{\phi 1}|$, $\varphi_{\phi 1}$ – модуль и фаза поля на ближней границе зоны Френеля $R_{\phi 1}$, $\varphi_{\phi 3}$ – фаза на расстоянии $3R_{\phi 1}$, фаза на графиках представлена как отношение $(\varphi - \varphi_{\Delta 3}) / \pi$

Аппроксимированные значения величин в данном масштабе полностью совпадают с вычисленными на основании разложения полей по пространственным гармоникам.

Опыт исследования характеристик реальной системы, которая длительное время использовалась при метеонаблюдениях вблизи границы суша–море [8], показал, что для определения параметров на нижнем участке достаточно учитывать только главный лепесток ДН. Возможно, что при иных конструкциях РА будет оказывать влияние первый боковой

лепесток, что приведет к качественным изменениям. Но необходимости в дальнейшем уточнении аппроксимации по углу места нет, так как диапазона углов θ , представленного на рис.2, будет достаточно для анализа всех физических факторов. Можно также считать волновые процессы в системах РАЗ квазистационарными и опустить эффекты, которые возникают при возбуждении апертур СШП сигналами [9].

Изменение фазы при изменении расстояния (рис.2, а, б) указывает на отличие фазовой скорости поля от скорости распространения плоской или сферической волны. Это изменение вносит вклад в вычисленное значение Δf_D . На рис.3 показано поведение добавок $\Delta f_D = [f_D(R) - f_D(\infty)] / f_D(\infty)$, обусловленное этими факторами для полей АИ и РА. На этом рисунке и далее все расстояния нормированы к λ_e .

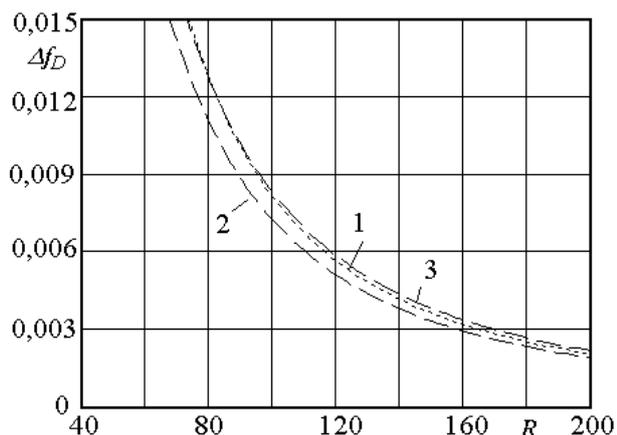


Рис. 3. Добавка к доплеровскому сдвигу частоты при точечных источниках

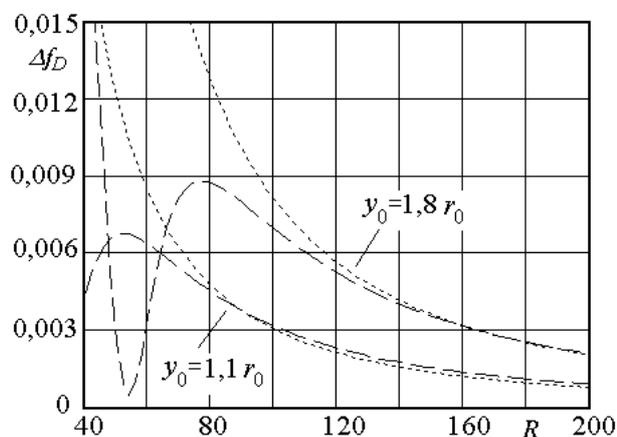


Рис. 4. Поведение Δf_D в области отделения первого бокового лепестка ДН

На этом рисунке представлены зависимости Δf_D для двух значений y_0 (штриховые линии), рассчитанные при условиях гауссового распределения интенсивности поля РА по углу места, но при реальных $\varphi_e(\theta, R)$. Для сравнения здесь и далее пунктиром показана идеализированная кривая для точечных РА и идеализированного отражателя при соответствующих значениях y_0 . Увеличение Δf_D по сравнению с идеализированной кривой при $R \rightarrow \infty$ обусловлено теми же причинами, что и общее увеличение f_D для бистатической системы. В области отделе-

На этом рисунке кривая 1 изображает идеализированную Δf_D , получающуюся при движении с постоянной скоростью точечного отражателя вверх из точки, расположенной посередине между РА, которые в этом случае также считаются монополями (здесь нужно учесть, что $f_D(\infty) < 0$). Этот фактор для бистатических систем является основным. Кривая 2 рассчитана при изменении фазы $\varphi_e(R)$ поля РА в соответствии с фазовыми зависимостями (рис.2, б), но при нарастании фазы акустического поля с постоянной скоростью $\frac{\partial \varphi_a}{\partial R} = 2\pi R$ и интег-

рировании вдоль направления главного максимума ДН АИ при $\Delta R = 7$. Кривая 3 рассчитана при обратных условиях: $\frac{\partial \varphi_e}{\partial R} = 2\pi R$, а $\varphi_a(R)$ как на рис.2, а. При этом также считалось, что верхний предел интегрирования $\theta_{\max} \rightarrow 0$. Интерпретация такого поведения зависимостей физически очевидна – фазовая скорость изменения поля у ближней границы зоны Френеля несколько выше, чем скорость распространения волн в свободном пространстве.

Для дальнейшего анализа физических факторов полезно рассмотреть два модельных случая. Первый (рис.4) показывает влияние изменений фазы между главным и первым боковым лепестком. На этом рисунке

ния первого бокового лепестка ($\theta \approx 0,15 \text{ рад}$ на рис.2, б) производная $\frac{\partial \varphi_e}{\partial R} < 0$, это компенсирует действие основного фактора и обуславливает уменьшение величины добавки Δf_D .

Во втором случае этот же механизм совмещен с действием пространственного изменения амплитуды полей обеих РА (рис.5). Это привело к существенному росту осцилляций

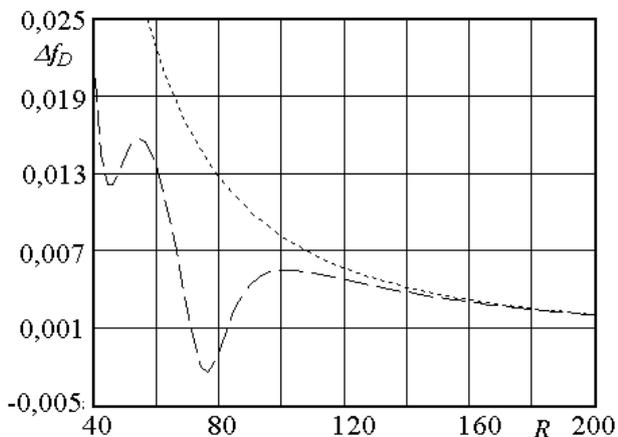


Рис. 5. Поведение Δf_D при совместном действии амплитудного и фазового распределений полей РА отделения первого бокового лепестка ДН

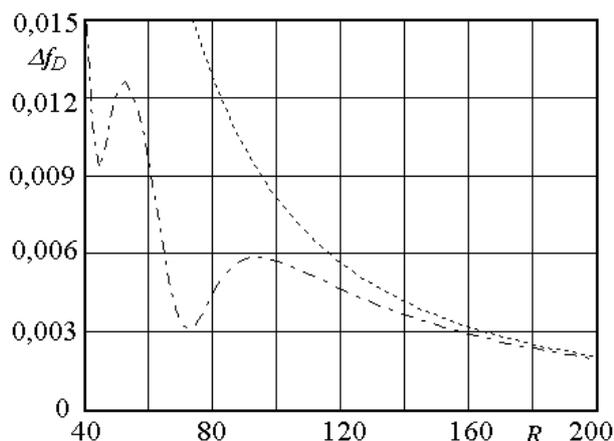


Рис. 6. Результирующая зависимость Δf_D

Δf_D . Сдвиг минимума в сторону увеличения R объясняется уменьшением амплитуды и, соответственно, вклада этого участка при интегрировании вдоль пакета (рис.2, б). Здесь также считалось, что $\theta_{\max} \rightarrow 0$. Появление первого минимума обусловлено постепенным вхождением пакета акустических волн в область взаимодействия ДН РА. При выбранных пределах аппроксимации на высотах $R < 40$ это взаимодействие отсутствует. В реальных системах РАЗ действие данных механизмов существенно слабее, так как поле на краях антенн имеет меньшую интенсивность, чем выбрано для расчетов. Но подобный выбор увеличил наглядность результатов. В реальных условиях оба механизма нужно учитывать, так как погрешность измерения температуры в значительной степени зависит от Δf_D .

При включении в расчет всех факторов характер поведения Δf_D в основном сохраняется (рис.6). Экстремумы сглажены, поскольку интегрирование проведено по всему объему пакета ($\theta_{\max} \approx 0,2$, $\Delta R = 7$).

Поведение амплитуды принимаемого сигнала $|U(R)|$ в основном определяется перекрытием ДН радиоантенн и сферической расходимостью волновых пучков

(рис.1). В дальней зоне она стремится к $1/R$ с соответствующими энергетическими коэффициентами. В бистатической зоне ее поведение и действие основных факторов представлено на рис. 7. На этом рисунке кривая 1 совмещает три случая, рассчитанные при тех же условиях, что и кривые на рис.3. Различие оказалось незначительным, и выделить их отдельно в данном масштабе невозможно. Кривая 2 рассчитывалась одновременно с Δf_D , показанной на рис.5. Здесь первый минимум обусловлен соприкосновением первых нулей ДН РА. На результирующей кривой (3) осцилляции увеличения интенсивности на начальном участке обусловлены взаимодействием первых боковых лепестков. В дальнейшем ее поведение соответствует предварительным результатам, показанным в [10].

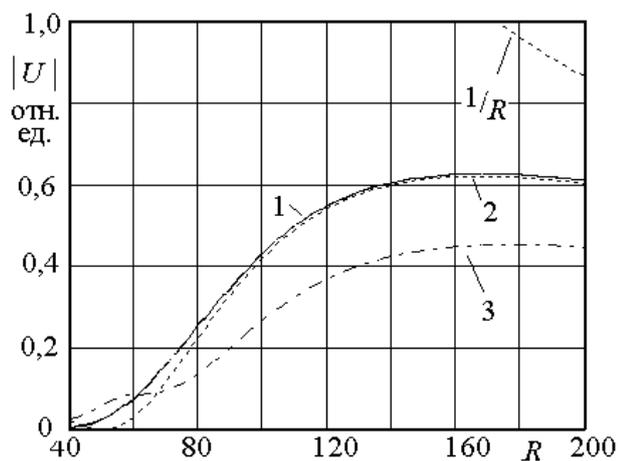


Рис. 7. Основные механизмы формирования ФРВ

Уточнение действия физических факторов, определяющих процесс дифракции электромагнитных волн на неоднородностях диэлектрической проницаемости воздуха при прохождении пакета акустических волн, показало, что приближения Френеля в основном достаточно для компенсации методической погрешности измерения температуры бистатическими системами РАЗ. Для проведения расчетов потребовалось разработка специальной методики аппроксимации пространственного распределения волновых полей, создаваемых апертурными антеннами. Последовательность расчетов соответствует современным представлениям теории волновых процессов, теории антенн. Тем не менее, необходимы экспериментальные подтверждения справедливости окончательного результата.

Список литературы: 1. Ульянов, Ю.Н. Двухчастотная радиоакустическая система // Труды VIII Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. – Томск, 1984. – Ч.2. – С.196-199. 2. Gerhard Peters, Barabara Hennemuth, Hans-Jurgen Kirtzel RASS Measured Temperature Gradients with a Bistatic Antenna Set-up // Proc. of 15th ISARS (Paris, June 27–30 2010). – Paris, 2010. P. 33 – 38. 3. Кон, А.И. Бистатическая система радиоакустического зондирования // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1981. – Т.17. – №6. – С.657-660. 4. Панченко, А.Ю. Дифракция электромагнитных волн на акустических при радиоакустическом зондировании атмосферы // Электромагнитные волны и электронные системы (Москва, Россия). – 1997. – Т.2, №5. – С.37-42. 5. Слипченко, Н. И., Лю Чан, Панченко, А. Ю. О допустимых упрощениях в дифракционной задаче на нижней границе бистатического РАЗ // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 2. – С. 15–19. 6. Панченко, А.Ю. Дифракционная модель ближнего радиоакустического зондирования // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – № 1. – С.35-39. 7. Слипченко, Н. И., Лю Чан, Панченко, А. Ю. Представление принимаемого сигнала при бистатическом РАЗ в приближении Френеля // Радиотехника. – 2011. – Вып. 167. – С. 59 – 65. 8. Ульянов, Ю.Н., Панченко, А.Ю. Максимова, Н.Г. Об использовании акустического и радиоакустического методов дистанционного зондирования АПС при получении метеоданных для оценки условий РРВ // Радиотехника. – 2005. – Вып. 143. – С. 188-195. 9. Дубровин, В.С., Колесникова, И.В. К расчету параболической антенны для сверхширокополосных систем радиодоступа // ГОУВПО НИ «Мордовский государственный университет им.Н.П. Огарева», Саранск / Режим доступа: http://fetmag.mrsu.ru/2010-1/pdf/Parabolic_Antenne.pdf 10. Слипченко, Н. И., Лю Чан, Панченко, А. Ю. К вопросу решения дифракционной задачи радиоакустического зондирования атмосферы бистатическими системами // Материалы 21-й Междунар. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 12-16 сент. 2011. – Т.2. – С.1075-1076.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 03.07.2012