

На правах рукописи

Колмаков Александр Анатольевич

**КРАЙНЕ НИЗКОЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
СИГНАЛОВ В ИОНОСФЕРЕ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2005

Работа выполнена в Томском государственном университете и
в Сибирском физико-техническом институте

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,
доцент С.А. Колесник

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Гинзбург Э.И.

доктор физико-математических наук,
профессор Сарычев В.Т.

Ведущая организация Институт солнечно-земной физики СО РАН

Защита состоится « 16 » февраля 2006 г. в 15 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.267.14 при Томском государственном
университете.

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Факс: (3822) 52-95-85

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского
государственного университета

Автореферат разослан « 13 » января 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

Нагорский П.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Ионосферная плазма является околоземной средой, играющей важную роль в эволюционном процессе формирования и развития биосферы на нашей планете. Она служит естественной защитой для живых организмов от космических лучей и излучения Солнца в широком диапазоне частот. Кроме того, ионосферная плазма на протяжении последних ста лет интенсивно используется как среда распространения радиоволн различных частотных диапазонов. Для задач дальней радиосвязи ионосферный канал наиболее широко используется в ВЧ–диапазоне. Это обусловлено тем фактом, что ВЧ–волны могут удерживаться в полости Земля–ионосфера, и, как следствие, распространяться на значительные расстояния.

В последнее время в проблеме солнечно-земных связей отмечается значение ионосферной плазмы как составного элемента околоземных резонаторов (шумановского и альвеновского) [8], выполняющих в ОНЧ– КНЧ–диапазонах роль ритмозадающих систем для разнообразных биологических объектов, в особенности различных форм высших позвоночных, в том числе человека. Наряду с этим существует возможность влияния на живые организмы ЭМ–излучений, содержащих модулирующие составляющие КНЧ–диапазона [9, 11]. В связи с этим, международными соглашениями и правовыми нормами различных государств КНЧ–диапазон является закрытым для средств радиосвязи, также наложен категорический запрет на излучение сигналов, содержащих модулирующие составляющие КНЧ–диапазона [1, 6].

Однако при проведении исследований спектрального состава ЭМ–полей было зафиксировано, что в ряде случаев в огибающих НЧ– и ВЧ–сигналов, распространяющихся через ионосферный канал связи, присутствуют четко выраженные модулирующие сигналы КНЧ–диапазона [2]. Обнаруженный эффект был назван КНЧ–модуляцией (КМ). Так же было установлено, что в ряде случаев идентичные спектральные реализации одновременно наблюдаются в различных частотных каналах – синхронная мультиканальная (СМ) КНЧ–модуляция

(СМКМ). В силу своей значимости обнаруженные эффекты требуют предварительного анализа, последующей систематизации и подробного изучения.

Целью диссертации является обоснование достоверности и установление основных закономерностей экспериментально обнаруженного эффекта КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов, распространяющихся через ионосферный канал связи. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- модернизация и тестирование измерительно-вычислительного комплекса для решения задачи мониторинга ЭМ фона в ВЧ–диапазоне;
- формирование временных рядов измерений характеристик КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов, распространяющихся в ионосфере;
- анализ временных рядов и установление основных закономерностей эффекта КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов с учетом особенностей состояния ионосферы.

На защиту выносятся следующие положения:

1. При распространении радиоволн ВЧ–диапазона через ионосферный канал связи в ~6% случаев происходит их модуляция крайне низкочастотными колебаниями (1–40 Гц) с длительностью более 6 минут. Частота появления КНЧ–модуляции изменяется с сезоном (максимум достигается летом (~12%), минимум – зимой (~3%)). Эта модуляция проявляется в виде трех основных типов:
 - монохроматическая модуляция в ~51% случаев;
 - модуляция на кратных частотах в ~32% случаев;
 - широкополосная модуляция в ~17% случаев.
2. КНЧ–модуляция ВЧ–радиоволн может проявляться синхронно на нескольких радиотрассах. Длительность непрерывной регистрации синхронной модуляции составляет от нескольких секунд до трех часов, а частота ее появления увеличивается при уменьшении разности между несущими частотами радиостанций и достигает максимума летом и минимума зимой
3. Причиной возникновения КНЧ–модуляции ВЧ–радиоволн является ионосферная плазма, а частота ее появления зависит от наличия в ионосфере

спорадических слоев над пунктом приема, на что указывает высокий процент их одновременного появления (~70% случаев), соответствие частоты модуляции гирочастотам ионов в области E ионосферы (Es слой) и зависимость частоты появления модуляции от типа слоев Es.

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных результатов и выводов определяется физической обоснованностью проведенных исследований, специальным тестированием измерительно-вычислительного комплекса, использованием достаточно больших рядов данных наблюдений, позволяющих сделать достоверные количественные оценки спектральных характеристик электромагнитного фона ВЧ-радиодиапазона и модулирующих сигналов КНЧ-диапазона, воспроизводимостью экспериментальных результатов, корректностью примененных методик исследования, проведенных расчётов и численных экспериментов, совпадением результатов математического моделирования с известными результатами, полученными ранее другими авторами для частных случаев.

Научная новизна

Впервые проведено исследование явления КНЧ-модуляции ВЧ-сигналов в ионосфере. Предложена и проведена классификация модулирующих сигналов на характерные типы. Установлены основные закономерности (сезонные, суточные, частотные) возникновения КНЧ-модуляции ВЧ-сигналов выявленных типов. Предложена и проверена гипотеза возникновения сигналов на кратных частотах при КНЧ-модуляции ВЧ-сигналов. Получено аналитическое решение нелинейного волнового уравнения для случая наклонного падения на слой ионосферной плазмы ВЧ-радиоволны с вектором поляризации, ортогональным плоскости падения радиоволны, что является обобщением известного частного случая нормального падения радиоволны с линейной поляризацией. Впервые проведено исследование явления синхронной мультисканальной КНЧ-модуляции ВЧ-сигналов, распространяющихся в ионосферном канале. Показано существование значимой статистической связи между появлением синхронной

мультиканальной КНЧ–модуляции и возникновением спорадических слоев Es в ионосфере над точкой регистрации.

Научная и практическая ценность работы

1. Доказано существование явления КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов, возникающего при ионосферном распространении радиоволн.

2. Уникальный измерительно-вычислительный комплекс, представленный в диссертации, позволяет проводить непрерывный мониторинг спектральных характеристик модулирующих составляющих (в частотной полосе до 40 Гц) ВЧ–сигналов в диапазоне частот от 1 до 32 МГц мировой сети радиовещательных станций.

Апробация работы. Результаты работы представлялись и обсуждались на I, II, III, IV Международных школах молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» (г. Томск, 1998 г., 2000 г., 2002 г., 2004 г.), I, II, III Региональных школах-семинарах молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии» (г. Томск, 2000 г., 2001 г., 2002 г.), IV, V, VI, Региональных школах-семинарах молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии и инновационного развития» (г. Томск, 2003 г., 2004 г., 2005 г.), XII Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению радиоволн (г. Долгопрудный, 2001 г.), IV, VI Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Волновые процессы в проблеме космической погоды» (г. Иркутск, 2003 г., 2005 г.), Международной конференции «Современные проблемы физики и высокие технологии», посвященной 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ (г. Томск, 2003 г.).

Связь темы диссертации с плановыми работами

Представленная работа выполнена в соответствии с направлением научных исследований, проводимых на кафедре космической физики и экологии РФФ ТГУ и лаборатории космической геофизики и экологии Сибирского физико-технического института. Это единый заказ-наряд «Исследование

фундаментальных закономерностей формирования экологически значимых электромагнитных полей окружающей среды естественного и антропогенного происхождения» (№ госрегистрации 0120.0 500864), гранты РФФИ (№01-05-65315, №01-04-49705) и гранты Министерства образования РФ (№97-03-25, №97-03-26).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 статей и трудов конференций и симпозиумов. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Взаимоотношения с соавторами. Основные результаты диссертации, опубликованные в 19 работах, являются оригинальными и получены лично автором. Совместно с руководителем была определена общая программа исследований и ее отдельные этапы. Разработка и создание пакета программ для обработки экспериментальных данных определения статистических закономерностей были проведены лично автором. Разработка и создание устройства активной фильтрации, используемого в измерительно-вычислительном комплексе, проводилась совместно с М.П. Ангеловым. Тестирование измерительно-вычислительного комплекса с целью установления возможности использования последнего для проведения экспериментальных исследований спектральных характеристик электромагнитного фона проводилось совместно с Б.М. Шинкевичем.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 54 рисунков, 10 таблиц, и списка литературы из 141 наименования. Общий объем – 136 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность и цель работы, отмечена новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость и реализация.

Первая глава состоит из литературного обзора нелинейных эффектов в ионосферной плазме. В обзоре собраны и обобщены результаты эмпирических и теоретических исследований эффекта самовоздействия радиоволн, эффектов нелинейного взаимодействия радиоволн, эффектов, возникающих при проведении различных активных экспериментов, рассмотрены неустойчивости в плазме.

Представлено явление крайне низкочастотной модуляции высокочастотных сигналов, возникающее при распространении ВЧ–радиоволн через ионосферу [2]. Дан обзор результатов исследований по данному вопросу, полученных к началу настоящей работы. Проводится обоснование постановки задачи, и рассматриваются пути ее решения.

Вторая глава посвящена описанию уникального измерительного комплекса [29], предназначенного для исследования явления КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов, и методики обработки экспериментальных данных. Приведены основные технические характеристики отдельных элементов и узлов измерительного комплекса, а так же комплекса в целом. Детально описана методика измерений и обработки экспериментальных данных по выделению случаев появления КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов.

Представлены результаты тестирования радиоприемного комплекса (РПК), с целью проверки возможности его использования для указанных выше исследований. В частности, рассматривается возможность самопроизвольного появления паразитных сигналов КНЧ–диапазона, которые можно было бы ошибочно принять за эффект КМ. Также представлен эксперимент по приему излученных сигналов с заданными характеристиками. Показано, что проведенное тестирование подтвердило возможность использования РПК для приема и регистрации КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов.

Отмечены особенности выбора передающих станций, сигналы которых регистрируются в ходе экспериментальных исследований. На основании предпринятых экспериментальных исследований и существующих физических представлений проведен анализ изменения уровня ЭМ–фона ВЧ–диапазона в точке приема (г. Томск) [20, 21], в результате которого осуществлен выбор передающих станций.

Третья глава содержит результаты анализа данных мониторинга ЭМ-фона и случаев возникновения явления КНЧ-модуляция ВЧ-сигналов. Показано, что уровень ЭМ-фона, определенный в настоящей работе, в среднем повторяет известные сезонно-суточные закономерности [20, 21], разработанная методика измерений позволяет регистрировать и выделять случаи появления КМ. В результате статистической обработки были определены основные характеристики КМ различных типов [17, 22].

В работе детально описывается явление СМКМ [18, 30], являющейся более узким классом КМ как таковой. Представлены основные статистические закономерности возникновения СМКМ [18]. Показано, что причины возникновения таких модуляционных проявлений в ВЧ-диапазоне должны определяться средой распространения, которая является общей для всех указанных частотных каналов и лежит в областях D и E ионосферы [17].

Особое внимание уделено исследованию спектральных характеристик КМ [29]. Проведенный анализ спектральных характеристик модулирующих сигналов показал, что имеет место совпадение максимумов частотного распределения случаев появления КМ с расчетными значениями гирочастот ионов, локализованных на высотах E области ионосферы, в частности, в спорадических слоях Es [12, 13, 14, 16, 28]. Выдвигается гипотеза, что возникновение КМ происходит посредством взаимодействия радиоволн с ионной компонентой плазмы, находящейся в магнитном поле Земли.

Рассмотрен еще один характерный вид КНЧ-модуляции – модулирующие сигналы с кратными частотами (СКЧ) [17]. При рассмотрении случаев появления СКЧ при КМ было установлено, что с увеличением несущей частоты происходит, в целом, уменьшение вероятности появления СКЧ. Подобное поведение интенсивности взаимодействия радиоволны с плазмой является характерным для нелинейности нагревного типа [3]. Также рассмотрена возможность проведения идентификации явления КМ с известными нелинейными эффектами [4]. В частности, в данной работе осуществлена проверка гипотезы о влиянии нелинейности нагревного типа на появление сигналов с кратными частотами. Для этого получено аналитическое решение нелинейного волнового уравнения в

приближении геометрической оптики для случая наклонного падения плоской электромагнитной волны на слой плазмы [26]. Получено численное решение указанного уравнения для случая с заданными гелиогеофизическими условиями и характеристиками ионосферной плазмы. Определен среднесуточный ход вероятности появления СКЧ. Проведено сравнение результатов вычислительного эксперимента с полученными эмпирическими закономерностями [26]. Дана физическая интерпретация полученных результатов.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния гелиогеофизических факторов на явление КМ. Рассмотрено влияние спорадических слоев на статистические характеристики СМКМ [18, 24]. Исследуется влияние основных параметров среднеширотных слоев E_s (действующей высоты, максимальной частоты, типа слоя) [5, 7, 10] на вероятность явления СМКМ [23, 27, 30]. Рассмотрена связь КМ с гелиогеофизическими факторами. В проводимых исследованиях в качестве основного параметра было выбрано среднесуточное значение вероятности появления случаев синхронной модуляции. В частности, исследуется влияние солнечной активности (числа Вольфа), уровня потока солнечного излучения ($F_{10.7}$), магнитной активности (A_p -индекс) на вероятность появления КМ, СМКМ [25].

В заключении приведены основные результаты и выводы проведенных исследований.

Список цитируемой литературы приведен в конце работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Введен в эксплуатацию многоканальный измерительно-вычислительный комплекс для проведения исследований КМ, позволяющий одновременно принимать до четырех радиовещательных станций ВЧ-диапазона, а также получать динамические амплитудно-фазо-частотные характеристики модулирующих КНЧ-сигналов в полосе частот до 40 Гц путем детектирования ВЧ-сигналов. Показано, что разработанный комплекс удовлетворяет предъявляемым требованиям и пригоден для исследования КМ в режиме непрерывного круглосуточного мониторинга ЭМ-фона ВЧ-диапазона.

Разработана методика регистрации ВЧ–сигналов, выделения и обработки случаев появления КМ, апробированная на протяжении 2-х лет.

2. Определена частота появления КМ на всем экспериментальном материале, которая составила примерно 6%. Установлена сезонно-суточная зависимость появления КМ: максимальная частота появления случаев КМ соответствует летнему сезону (~12%), минимальная – зимнему (~3%); в осенний период частота появления КМ (~4.5%) несколько превосходит значения весеннего периода (~4%).

3. Предложена и проведена следующая классификация КМ по типу модулирующих сигналов:

- монохроматический сигнал (от числа всех случаев КМ ~ 51%);
- сигналы на кратных частотах (~ 32%);
- широкополосный сигнал (~ 17%).

4. Установлено, что модулирующие сигналы этих типов могут проявляться синхронно на нескольких каналах регистрации. Длительность непрерывной регистрации СМКМ составляет от нескольких секунд до трех часов. Частота появления СМКМ на ансамбле, состоящем из четырех радиовещательных станций, составляет ~12%, причем доля случаев появления СМКМ на двух каналах составляет ~48.3% от общего числа случаев появления СМКМ, на трех и четырех каналах – ~32.4% и ~19.3% соответственно.

5. Установлена сезонно-суточная зависимость появления СМКМ: максимальная частота появления случаев СМКМ соответствует летнему сезону (~20% от общего числа экспериментальных данных для этого сезона), минимальная – весеннему (~4%); в осенний период частота появления СМКМ (~15%) превосходит значения, наблюдаемые в зимний период (~4%). Суточные закономерности появления СМКМ имеют тенденцию плавного изменения при смене сезонов.

6. Установлено соответствие частот крайненизкочастотной модуляции расчетным значениям гирочастот ионов металлов, локализованных на высотах E области ионосферы, в частности, в спорадических слоях Es. Доля случаев

появления СМКМ одновременно со спорадическими ионосферными слоями Es над г. Томском составляет ~70% от числа всех случаев появления СМКМ. Это указывает на возможность влияния спорадических слоев Es на формирование СМКМ ВЧ-сигналов.

7. Спорадические слои разных типов (с, l, h, f) в различной мере оказывают влияние на частоту появления СМКМ. Наибольший относительный вклад в дневные часы вносят слои с-типа (для канала f₀6 вероятность возникновения СМКМ составляет ~14%, а для f₁5 ~8%), а в ночные – f-типа (для канала f₀6 вероятность возникновения СМКМ составляет ~8%, а для f₁5 ~12%). Слои l и h-типов относительно менее часто приводят к появлению СМКМ.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Article 17 // J. Radio Regulations. Geneva, 1995.
2. Белов В.А., Колесник А.Г., Колесник С.А. и др. Проблемы электромагнитной экологии // Конверсия. Спец. вып. «Конверсия вузовской науки: экологические технологии и оборудование». – М.: ИЗАНА, 1996. – № 6. – С. 43.
3. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1976. – 611 с.
4. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука, 1973. – 272 с.
5. Ионосферные исследования // Исследования спорадического слоя Es №50. – Казань: Изд. Казанского университета, 1997. – 264 с.
6. Регламент радиосвязи (Женева, 1979): В 2 т. – М.: Радио и связь, 1985-1986.
7. Руководство по интерпретации и обработке ионограмм. – М.: Наука, 1969. – 156 с.
8. Колесник А.Г., Бородин А.С., Колесник С.А., Побаченко С.В. Резонансный механизм солнечно-земных связей // Изв. вузов. Физика. – 2003. – №8. – С. 23-30.
9. Сидякин В.Г., Темурьянц Н.А., Макеев В.Б., Владимирский Б.М. Космическая экология. – Киев: Наукова думка, 1985. – 176 с.
10. Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К. и др. Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. – М.: Наука, 1975. – 120 с.

11. Эйди У.Р. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань // ТИИЭР. – 1980. – Т. 68, 1. – С. 140.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

12. Деревянных А.А., Колмаков А.А. Исследование появления КНЧ–сигналов в полосе частот 26-36Гц // III школа-семинар молодых ученых “Современные проблемы физики и технологии”. Сборник статей молодых ученых – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – С. 192-194.

13. Деревянных А.А., Колмаков А.А. Исследование появления КНЧ–сигналов в полосе частот 26-36Гц // Физика окружающей среды: Материалы IV Международной школы молодых ученых и специалистов. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. – С. 79-81.

14. Деревянных А.А., Колмаков А.А. Исследование сигналов КНЧ–диапазона в полосе частот 26-36Гц // Изв. вузов. Физика. – 2005. – № 6. – С. 113-114.

15. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Марков Г.А., Нагорский П.М., Шинкевич Б.М. Шумановские резонансы. 2. Сезонно-суточные вариации резонансных частот // Изв. вузов. Физика. – 2003. – №11. – С. 92–95.

16. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Нагорский П.М., Шинкевич Б.М. Регистрация и исследование сигналов повышенного уровня в электромагнитном фоне диапазона крайне низких частот // Вестник ТГУ. – №278, сентябрь, 2003. – С. 141-146.

17. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Шинкевич Б.М. Анализ данных многолетнего мониторинга электромагнитных полей // Изв. вузов. Физика. – 2000. – №1. – С. 96-98.

18. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Шинкевич Б.М. Исследование появления КНЧ–модуляции в ВЧ–сигналах по данным электромагнитного мониторинга // Изв. вузов. Физика. – 2001. – №1. – С. 64-67.

19. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Шинкевич Б.М. Шумановские резонансы. 1. Мониторинг электромагнитного фона КНЧ–диапазона // Изв. вузов. Физика. – 2003. – № 2. – С. 69-73.

20. Колесник С.А., Колмаков А.А., Топольник С.В. Сезонно-суточные вариации уровня ЭМ фона в диапазоне частот 1–7МГц // Труды XII Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению радиоволн. – Долгопрудный: Изд. МФТИ. – Т.2. – 2001. – С. 369-370.
21. Колесник С.А., Колмаков А.А., Топольник С.В., Шинкевич Б.М. Электромагнитный фон высокочастотного и среднечастотного диапазона в западной Сибири // Электронный журнал. «Исследовано в России». – 2002. – 18. – С. 192-201. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/018.pdf>.
22. Колмаков А.А. Исследование КНЧ–модуляции высокочастотных электромагнитных излучений в окружающей среде // Сборник трудов Международной школы молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды». – Изд. СО РАН, 1999. – С. 130-134.
23. Колмаков А.А. Исследование КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов // «Экологические проблемы и пути их решения». Сборник научных трудов аспирантов и студентов. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – С. 76-83.
24. Колмаков А.А. Исследование появления КНЧ–модуляции в ВЧ–сигналах по данным электромагнитного мониторинга // «Современные проблемы физики и технологии». – ЗАО “ИНТЛ”, 2000. – С. 101-103.
25. Колмаков А.А. Исследование появления КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов // III школа-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии». Сборник статей молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002 – С. 199-201.
26. Колмаков А.А. Исследование появления сигналов с кратными частотами при КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов // Изв. вузов. Физика. – 2005. – № 6. – С. 125-126.
27. Колмаков А.А. Исследование связи между появлением синхронной мультиканальной КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов и крупномасштабными неоднородностями в Е области ионосферы // Труды Второй и Третьей Международной школы молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды». – Томск, 2002. – С. 69-71.
28. Колмаков А.А. Исследование спектральных характеристик КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов // Материалы IV Международной школы молодых ученых и

специалистов «Физика окружающей среды». – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. – С. 81-84.

29. Колмаков А.А. Исследование частотных закономерностей КНЧ–модуляции ВЧ–сигналов // V школа-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития». Сборник статей молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – С. 178-180.

30. Колмаков А.А. Синхронная мультиканальная КНЧ–модуляция ВЧ–сигналов // II школа-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии». Сборник статей молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. – С. 267-271.