

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТЕОРНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Широко известное явление метеор, возникающее при попадании в атмосферу Земли мелкой космической частицы, приводит не только к видимому свечению на небесной сфере. Вызываемая метеорными частицами ионизация оказывается достаточной для отражения радиоволн метрового диапазона, благодаря чему создаётся возможность для радиосвязи между пунктами, удалённым друг от друга на расстояния до 2000...2200 км (рис. 1). Этому виду связи, получившему название метеорная радиосвязь, её достоинствам, особенностям истории и перспективам развития посвящена данная статья.

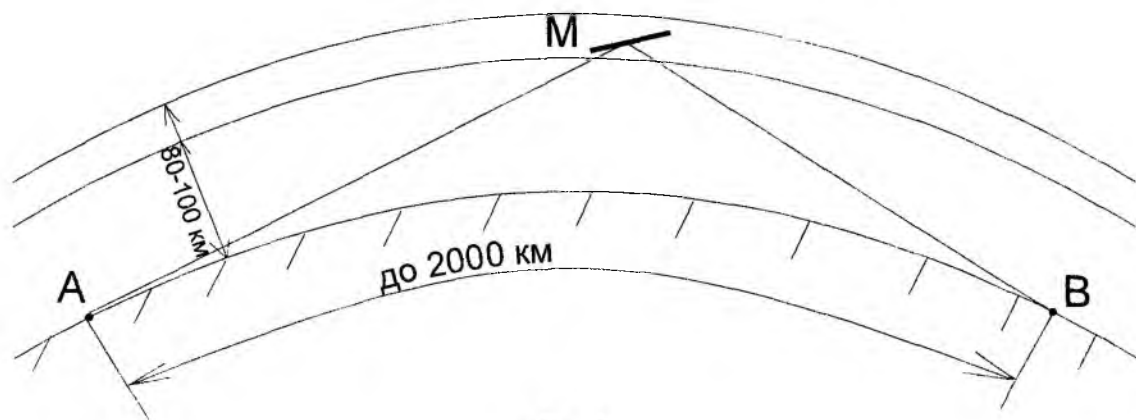


Рис. 1

Расстояние в 2000 км между пунктами связи определяется высотой 80-100 км, на которой происходит образование метеорных следов. Следует отметить, что нижней границы дальности для метеорной связи нет, в отличие от ионосферного или дальнего тропосферного распространения радиоволн, для которых существует «зона молчания».

Основной кажущийся недостаток метеорной связи – прерывистость. Действительно, хотя канал и возникает случайным образом с интервалом от нескольких десятков секунд до нескольких минут, а существует от нескольких десятков миллисекунд до единиц секунд, но при наличии накапливающих информацию устройств на приёмной и передающей сторонах прерывистость не является серьёзным недостатком. Достаточно сказать, что передача цифровых данных в любой компьютерной сети также является прерывистой. Поэтому для оценки пропускной способности метеорного радиоканала используется понятие коэффициента заполнения, обозначаемого буквой η и равного отношению времени существования канала к полному времени работы линии метеорной связи. Его величина составляет, как правило, единицы процентов и зависит от мощности передатчиков, расстояния между пунктами и рабочей частоты.

Близкий к зеркальному характер отражения и, как следствие, малые потери в канале, позволяют работать при небольшой средней мощности передающих устройств и небольшой потребляемой мощности. Для большинства известных систем метеорной связи импульсная мощность передатчика составляет сотни ватт – единицы киловатт, а средняя (с учётом коэффициента заполнения) – единицы – десятки ватт.

Следует отметить, что благодаря направленному характеру распространения отражённых метеорными следами радиоволн заметно ограничена возможность перехвата сообщений, передаваемых по радиолинии метеорной связи. Тот же направленный характер распространения создаёт так называемую пространственно-временную избирательность, позволяющую осуществлять сеансы радиосвязи попеременно с большим количеством пространственно разнесённых корреспондентов на одной частоте. Число таких корреспондентов может превышать тысячи.

Безусловным достоинством метеорной радиосвязи является её независимость от наличия и работоспособности наземных и космических линий связи, а также в значительной мере и от состояния ионосферы. Повышение ионизации в нижних слоях ионосферы, которое может быть вызвано как естественными, так и искусственными причинами, делает невозможным дальнейшее распространение дека-

метровых волн, но не препятствует метеорной радиосвязи. Кроме того, поскольку отражение радиоволн от метеорных следов происходит на высотах около 100 км, это в ряде случаев позволяет работать при больших углах возвышения главных лепестков диаграммы направленности (ДН) антенн, что может быть необходимо, например, в условиях горной местности.

Среди особенностей метеорного радиоканала следует также отметить наличие суточных колебаний коэффициента заполнения, связанного с орбитальным движением Земли и её вращением вокруг оси. Максимум метеорной активности приходится на утренние часы, минимум — на вечерние.

История развития метеорной связи насчитывает около 50 лет. Наиболее интенсивно исследования метеорного радиоканала проводились в СССР, США и Канаде — в странах с очень большой протяжённостью и территориями со слабо развитой связью, особенно в полярных районах. Первая экспериментальная радиопередача двусторонней прерывистой метеорной связи "JANET" начала действовать в Канаде в 1955 году на трассе длиной 960 км. Линия работала на несущей частоте около 40 МГц с разносом частот прямого и обратного каналов 1 МГц. Непрерывно излучаемая мощность составляла 500 Вт. Для накопления данных применялись магнитофоны с переменной скоростью движения ленты [1].

Метеорная система КОМЕТ использовалась для связи между штабами НАТО в Европе на трассе длиной около 1000 км между Нидерландами и югом Франции. В ней использовались частоты 36 и 39 МГц. Мощность обоих передатчиков составляла 200 Вт, использовалась частотная манипуляция [2].

В настоящее время на базе современной микропроцессорной техники созданы компактные и совершенные системы радиометеорной связи. Примерами таких систем могут служить SNOTEL, TRANSTRAC, AMBCS (США). Система AMBCS обеспечивает автоматический сбор метеорологической и полётной информации в 11 западных штатах США и на Аляске. Система SNOTEL объединяет более 500 необслуживаемых станций, предназначенных для передачи метеорологической информации, данных для морской и воздушной навигационных систем и других сообщений. При времени ожидания связи менее 10 минут система обеспечивает надёжность связи 93% [3]. В состав базовой станции входит мини-ЭВМ, возбудитель передатчика, передатчик мощностью 300 Вт, вместо которого в случае необходимости может применяться передатчик мощностью 10 кВт, малошумящий приёмник. Разнос рабочих частот приёмника и передатчика на 1 МГц позволяет использовать для приёма и передачи одну и ту же антенну при дуплексной работе. Окружающее пространство разделено на 6 секторов по 60°, каждый из которых контролируется своей антенной типа «волновой канал». Оптимальный для передачи сектор выбирает мини-ЭВМ.

В начале 90-х годов в США внедрена большая система метеорной связи TRANSTRAC, рассчитанная на получение данных о местонахождении более чем 64 тысяч транспортных средств, а также двустороннюю передачу коротких сообщений на всей континентальной территории этой страны. Система объединяет устройство получения данных для определения координат объекта при помощи навигационных систем и передачу этих данных и других сообщений при помощи метеорной связи. Система имеет пять базовых станций, каждая из которых оснащена передатчиком мощностью 2 кВт, работающим на всенаправленную антенную систему. Расположение базовых станций таково, что обеспечивает обслуживание всей территории Соединённых Штатов. Поскольку мощность передатчиков на транспортных средствах ограничена, а их антенны слабо направлены, каждая базовая станция имеет шесть приемных антенн, обеспечивающих приём со всех направлений.

В Советском Союзе исследование и использование метеорного канала связи осуществлялось, как правило, в военных целях, что объясняет скудность имеющейся информации по данному вопросу. Исследования проводились в Харькове, Ленинграде и Казани, аппаратура метеорной связи использовалась в полярных районах, в частности на линии Салехард — Норильск.

Одна из областей, в которой нашла своё применение метеорная связь в СССР, а затем в странах СНГ — высокоточное сличение шкал времени, чему посвящена отдельная статья в данном сборнике.

Обзор научных публикаций последнего времени показывает, что несмотря на бурное развитие оптоволоконных и спутниковых систем связи, интерес к метеорной связи в мире сохраняется, о чём свидетельствуют [4 - 9]. Как явствует из географии ссылок, интерес к метеорному радиоканалу проявляется не только в США и Канаде, но и в Норвегии, Японии, Саудовской Аравии. Основное внимание в современных публикациях уделяется уже не физическим особенностям метеорного канала связи, а тому, каким образом наиболее эффективно использовать этот прерывистый канал с изменяющимися характеристиками для передачи данных. Одним из подтверждений интереса к метеорной связи в мире может служить тот факт, что в [7] рекомендовано специально выделить для неё диапазон частот 39...39,2 МГц.

Следует подчеркнуть, что метеорная радиосвязь не была и не будет альтернативой проводной, мобильной или спутниковой связи. Она является специальным видом связи для специфических условий или чрезвычайных ситуаций.

Первые работы по исследованию метеорного распространения радиоволн для целей связи в Проблемной научно-исследовательской лаборатории радиотехники (ПНИЛ РТ) начались в конце 50-х годов. В 1957 – 1960 годах впервые в мире были проведены экспериментальные исследования направленности метеорного распространения радиоволн, которая обуславливает достаточно малую вероятность совпадения во времени сигнала в пунктах, разнесённых на определённое расстояние. Было также исследовано многолучевое распространение сигнала, которое может возникать при одновременном его отражении от различных следов или от участков одного искривлённого следа [10].

Возникший в 70-е годы интерес к применению сложных широкополосных сигналов в системах метеорной связи и сличения шкал времени привёл к созданию специальной аппаратуры для исследования поведения ширины полосы пропускания в радиометеорном канале [11]. Исследования показали, что с вероятностью близкой к единице она составляет примерно 10 МГц. Это позволило создать комплексы сличения шкал времени «Метка-3», «Метка-4», а также многофункциональный комплекс «Метка-10», предназначенный для одновременного проведения как процессов передачи служебной информации, так и процедур высокоточной привязки шкал времени с погрешностью порядка единиц наносекунд [12-15]. Оригинальное техническое решение, обеспечившее максимальное использование свойств канала, защищено патентом [27]. Дальнейшее развитие идеи использования радиометеорного канала совмещённого для решения задач передачи информации и измерения сдвига шкал времени привело к созданию экспериментального комплекса «Метка-11», обладающего погрешностью в десятые доли наносекунд [28].

После длительного перерыва второе поколение аппаратуры метеорной связи под общим названием «Депеша» было разработано, создано и экспериментально исследовано сотрудниками ПНИЛ РТ в 1990 – 1991 годах. Эксперименты проводились на трассах Харьков – Ленинград в октябре 1991 и Харьков – Киев в декабре 1992 года. Исследовались узкополосные (до 10 кГц) радиометеорные каналы передачи информации. Передача велась на частоте 36,9 МГц при импульсной мощности 500 Вт. В качестве сигнала использовался двухчастотный сигнал (ДЧС). На трассе Харьков – Киев эта аппаратура обеспечивала передачу сообщений со средней скоростью около 20 бит/с.

Впервые в СССР был осуществлён обмен информацией (Харьков – Ленинград) с применением вертикальной поляризации и простейшей антенной системой типа «штырь». Тем самым была экспериментально доказана возможность использования простейших антенн в системах радиометеорной связи на таких объектах, как автомобили, суда и т. д. Работы проводились совместно с ЛНРТИ, ныне Российский институт радионавигации и времени (РИРНИВ), г. Санкт-Петербург.

Дальнейшие исследования были направлены на максимизацию используемого в радиометеорном канале связи энергетически-информационного потенциала в отведённой полосе частот [29]. С этой целью были изготовлены макеты аппаратуры на частоты 57,3 МГц и 42,5 МГц, получившие название «Депеша-М», причём в качестве переносчика сообщений использовались сигналы типа ДЧС, МЧМ, сигналы со спектральными характеристиками, максимально приближенными к прямоугольным. Это комбинированные сигналы типа МЧС-ЧМ и V-ЧМ-ЧМ. Исследования проводились на трассе Харьков – Балаклеяская полевая лаборатория в режимах, близких к локационным (антенны корреспондентов направлены коллинеарно). Полученные результаты показали, что радиометеорный канал связи способен решать целый ряд специфических задач: сбор и передача информации от датчиков в удалённых районах и т. п.

Исчезновение Советского Союза в значительной степени повлияло на тематику и направление работ ПНИЛ РТ в области метеорной связи. Остался незавершённым ряд работ, выполнявшихся в интересах силовых министерств СССР. Сравнительно небольшие территориальные размеры Украины, а также стремление закрыть существовавший теоретический «пробел» побуждали харьковских исследователей заняться изучением вопроса распространения радиоволн на короткие (до 400 км) расстояния, которые длительное время считались «зоной молчания». Для этих целей была разработана математическая модель метеорного радиоканала, учитывающая пространственное распределение метеорных радиантов по небесной сфере [16]. Астрономической основой модели явились результаты многолетних наблюдений, проводившихся в ПНИЛ РТ [17]. Результаты исследований, опубликованные в [16, 18], показали, что для получения наибольшего коэффициента заполнения на короткой трассе необходимо согласованно изменять ориентацию ДН антенн в обоих пунктах в течение суток. Это связано с суточным изменением расположения так называемых «горя-

чих зон» — областей максимальной концентрации полезных для связи метеоров. Это изменение не существенно для длинных трасс, но оказывает большое влияние на коротких. Результаты моделирования проверялись экспериментально на трёх коротких трассах в пределах Харьковской области (рис. 2). На рис. 3 показан суточный ход коэффициента заполнения на трассе Харьков – Полевая лаборатория при неизменной и переменной ориентации антенн. В рамках работ по созданию новых образцов аппаратуры метеорной связи в ПНИЛ РТ были разработаны малогабаритные транзисторные передатчики с питанием от автомобильного аккумулятора. При размерах, показанных на рис. 4, и массе 5 кг передатчик обладает выходной мощностью 500 Вт при скважности не менее 50 [19].

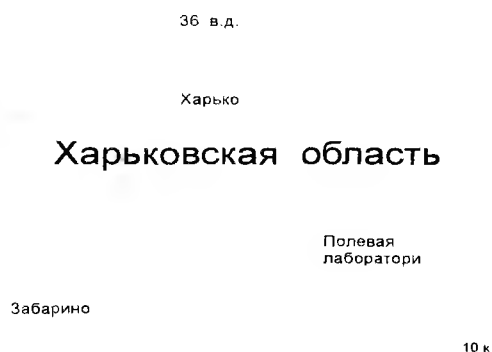


Рис. 2

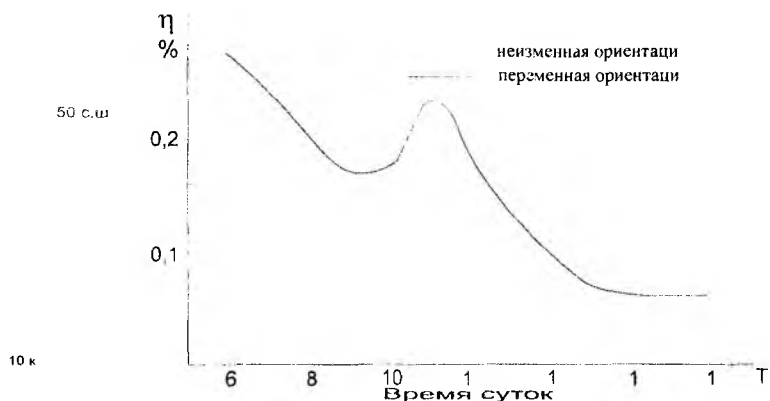


Рис. 3

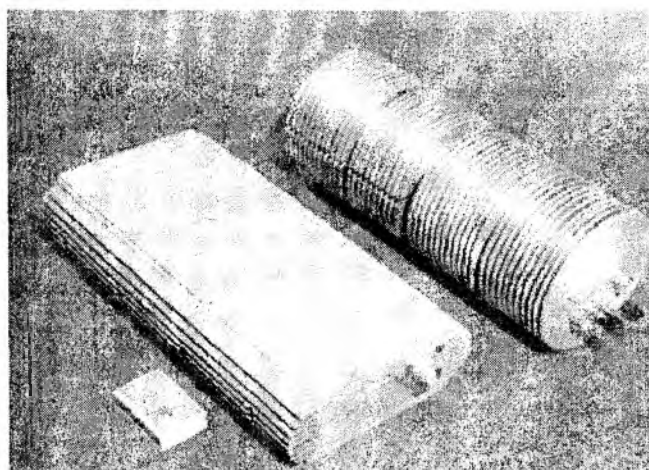


Рис. 4

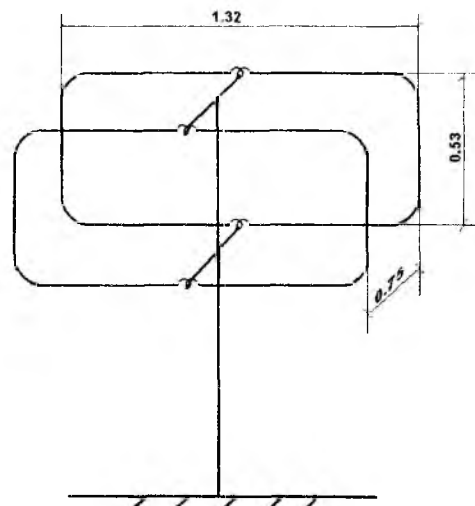


Рис. 5

Новое поколение аппаратуры метеорной связи с использованием современной микропроцессорной техники разрабатывались специалистами ПНИЛ РТ с начала 90-х годов. На микропроцессор возлагается задача накопления информации, поступающей от внешнего источника, разделение её на пакеты определённой длины, формирование зондирующего сигнала, применяемого для обнаружения канала, приём, передача и подтверждение приёма, а также восстановление исходного сообщения из принятых пакетов [20].

В середине 90-х годов в ПНИЛ РТ была разработана простая, недорогая, универсальная аппаратура, пригодная как для радиометеорной связи на расстояние до 2000 км, так и для в пределах прямой видимости [21]. В качестве основы комплекса была использована типовая радиостанция «ЛЁН», осуществляющая ближний УКВ радиообмен в штатном (телефонном) режиме. При этом применяется штыревая антенна. Для работы по метеорному радиоканалу станция дополнена усилителем мощности (рис. 4), частотным модулятором, демодулятором и контроллером на однокристалльном микропроцессоре, который управляет обменом информацией по метеорному радиоканалу. Обмен осуществляется с мгновенной скоростью 2400 бит/с. Антенной является пятиэлементный «волновой канал».

Специально для размещения на подвижных объектах в ПНИЛ РТ была разработана малогабаритная рамочная антенна, изображённая на рис. 5. Ширина главного лепестка на уровне 0,7 равна 63°, уровень задних лепестков не превышает 12% от главного, КСВ в фидере около 1,5 [22].

Наряду с созданием аппаратуры на современной элементной базе в ПНИЛ РТ проводятся теоретические и экспериментальные исследования по повышению эффективности использования метеорного радиоканала. В частности, были проведены исследования характера и мест возникновения искажений при передаче информации по метеорному радиоканалу. Результаты этих исследований [23] позволяют утверждать, что при мощности передатчика 500 Вт в полосе частот 10 кГц имеют место только ошибки, обусловленные рассеянием следа в конце времени его существования. «Вспышки ошибок» в середине времени существования следа как систематическое явление не наблюдаются.

Поскольку в начале каждого сеанса метеорной связи необходимо осуществить синхронизацию тактового генератора модема приемной станции для синхронного приема информационного пакета, то в ПНИЛ РТ был разработан способ синхронизации при метеорной связи, подробно описанный в [24]. Суть способа состоит в том, что синхронизация осуществляется передним фронтом быстро нарастающего сигнала, а проверка её правильности происходит путём сравнения принятого кодового сочетания с контрольным. В настоящее время в ПНИЛ РТ продолжают как теоретические исследования метеорного радиоканала, так и создание новых образцов аппаратуры метеорной связи. Среди теоретических работ следует отметить [25], в которой рассмотрена возможность сверхдальнего метеорного распространения радиоволн путём их двукратного отражения от метеорных следов и одного отражения от земной поверхности. На основании приближённых оценок сделан вывод о том, что такое распространение возможно, но коэффициент заполнения на сверхдлинной трассе резко убывает с увеличением расстояния, и для расстояния 4000 км составляет менее 0.1 %.

С целью повышения эффективности использования метеорного радиоканала в работе [26] предлагается применять переменную скорость передачи данных. Скорость должна снижаться по мере рассеяния следа и ухудшения отношения сигнал/шум. Наиболее приемлемыми способами изменения скорости передачи следует считать такие, при которых ширина спектра сигнала остаётся постоянной, что позволяет рационально использовать выделенную полосу частот и не требует изменения полосы пропускания приёмника. Поэтому рассмотрен путь решения аналогичной задачи в модемной (телефонной) связи, где передача осуществляется в постоянной полосе частот, но скорость при этом может изменяться в десятки раз за счёт специальных способов модуляции, позволяющих кодировать несколько бит в одну информационную посылку. К таким видам модуляции относится относительная фазовая модуляция (ОФМ). Реализуемый с помощью ОФМ системный обмен «полоса частот — динамический диапазон» позволяет за счёт изменения скорости передачи повысить эффективность использования метеорного радиоканала.

Отсутствие «зоны молчания» может быть использовано для радиосвязи с судами при их удалении на расстояния от 0 до 2000 км, при этом не требуется изменять рабочие частоты в зависимости от расстояния и времени суток, как это приходится делать при работе на декаметровых волнах.

Направленность распространения радиоволн, обеспечиваемая метеорным радиоканалом, также может найти применение там, где требуется скрытная передача данных.

Перспективы практического использования метеорной связи для Украины и стран СНГ представляются благоприятными. В частности, метеорная радиосвязь может найти применение для сбора метеорологической информации и данных об уровне воды в бассейне реки Тиса, поскольку в условиях горной местности использование иных видов связи оказывается проблематичным [30]. Следует отметить, что благодаря пространственной избирательности увеличение числа периферийных пунктов практически не снижает скорость приёма информации от каждого из них.

Список литературы: 1. *Davis G. E., Gldys S. J.* Canadian JANET system. Proc. IRE, 12, 1957. 2. *Bartholome P.I., Vogt I. M.* A new meteor-burst system incorporating ARQ and diversity reception. IEEE Trans. on Comm. Tehnology v.16, N 2, Apr. 1968. 3. *Кащеев Б. Л., Бондарь Б. Г.* Метеорная связь: Уч. пособие. – К.: УМК ВО, 1989.- 76 с. 4. *Ericson T., Zander J.* Meteor Burst Communication without feedback, IEEE Trans. Comm, vol 43, no 2/3/4, Apr. 1995. 5. *Nagasawa M., Azuma K., Ishii H.* Properties of meteor burst communication channel in Japan. Numazu Techn. Annual N 28, 1993 p. 61. 6. *Wilkins C. S.* Erasure insertion methods for meteor-burst communication systems with fixed- and variable-rate coding, IEEE Trans. on Comm.,v.45, 1997 - P. 625-628. 7. Summary Report from the Working Group Frequency Management 1998 in Tallinn, Estonia 8. <http://www.raytheon.com/milcom98/progu1.htm>. 9. <http://www.borg.com/warrend/metburdu.html>. 10. *Кащеев Б.Л., Бондарь Б. Г.* Метеорная связь – К.: Техніка, 1968.- 196 с. 11. *Кащеев Б. Л., Леман Ю. А., Нестеренко Г. В.* Методы повышения точности метеорных систем сличения шкал времени при помощи шумоподобных сигналов // Труды Всесоюз. семинара-совещания «Мет-

рология в радиоэлектронике». - М.: ВНИИФТРИ. – 1975. - С. 109-110. 12. *Кащеев Б. Л., Нестеренко Г. В., Дудник Б. С.* Передача служебной информации о сдвиге шкал времени по метеорному радиоканалу с использованием ЛЧМ сигнала. // Сб. научн. трудов ВНИИФТРИ «Исследование в области измерений частоты и времени». - М.: 1989. – С. 73-76. 13. *Кащеев Б. Л., Нестеренко Г. В., Семёнов С. Ф.* Высокоточная радиометеорная система синхронизации эталонов времени Госстандарта СССР (состояние и перспективы развития). // Труды IV Всесоюзн. симпозиума по исследованиям в области времени и частоты. – М.: - 1990. - С. 153-156. 14. *Кащеев Б. Л., Нестеренко Г. В., Мальняк.* Автоматизированная радиометеорная система сличения шкал времени с гибкой структурой. // Труды IV Всесоюзн. симпозиума по исследованиям в области времени и частоты. – М.: - 1990.-С. 148. 15. *Горбач В. И., Ермолаев Е. П., Нестеренко Г. В.* Организация совмещённого канала передачи информации в радиометеорном комплексе сличения шкал времени сигналами с V-образной ЧМ. // Труды IV Всесоюзн. симпозиума по исследованиям в области времени и частоты. - М.: -1990.- С. 159. 16. *Антипов И. Е.* Оптимизация ориентации диаграмм направленности антенн метеорных радиотехнических систем с целью повышения их пропускной способности в условиях коротких трасс. Дисс... канд. техн. наук: 05.12.21.- Харьков, 1996. - 148 с. 17. *Волощук Ю. И., Кащеев Б. Л.* Распределение метеорных тел вблизи орбиты Земли. - М.: Наука. - 1981. – 187 с. 18. *Антипов И. Е.* Экспериментальные исследования метеорного распространения радиоволн на короткие расстояния // Труды Междунар. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". – Туапсе. - С. 79. 19. *Кащеев Б. Л., Бондарь Б. Г., Антипов И. Е.* Перспективы использования метеорной связи. Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1998. Вып. 106. С. 49–51. 20. *Антипов И. Е., Бондарь Б. Г.* Устройство управления станцией метеорной связи на однокристалльном микропроцессоре // Труды Междунар. конф "Техника и физика электронных систем и устройств". - Сумы: - 1995.- С. 103-104. 21. *Антипов И. Е., Бондарь Б. Г.* Построена система метеорного та локального УКХ зв'язку // Інформаційний Бюлетень Української Астрономічної Асоціації.- К.: ВПЦ "Наукова книга", -1996.- № 9.- С. 55-56. 22. *Бондарь Б. Г., Кащеев Б. Л.* Резонансная антенна для метеорной связи. Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1998 Вып. 107. С. 28 – 30. 23. *Антипов И. Е., Бондарь Б. Г.* О групповых ошибках в метеорном радиоканале // Труды Междунар. конф "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". - Туапсе. - 1998. - С. 60. 24. *Антипов И. Е., Бондарь Б. Г.* Способ синхронизации при метеорной радиосвязи // Заявка на изобретение № 94030781 от 11.6.93. 25. *Антипов И. Е., Бондарь Б. Г.* О сверхдальнем метеорном распространении метровых волн // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып. 113. С. 14–17. 26. *Антипов И. Е., Коваль Ю. А., Нестеренко Г. В.* Переменная скорость передачи в метеорном радиоканале // Труды Междунар. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". - Туапсе. - 2001.– С. 120-121. 27. Пат. № 1808135 России М кл⁵ G 04 С 11/02 / *Горбач В. И., Кащеев Б. Л., Нестеренко Г. В.* / Опубл. 07.04.93. Бюл. № 13. 28. Пат. № 20380 України кл⁵ G 04 С 11/02 / *Кащеев Б. Л., Нестеренко Г. В., Семенов С. Ф., Кундюков С. Г.* / Опубл. 15.07.97. 29. *Горбач В. И., Нестеренко Г. В.* Про максимізування інформаційно-енергетичного потенціалу радіометеорного каналу // Інформаційний Бюлетень Української Астрономічної Асоціації.- К.: ВПЦ "Наукова книга", - 1996. - № 9. - С. 46. 30. *Антипов И. Е., Байдак В. М., Горбач В. И., Коваль Ю. А., Нестеренко Г. В., Слипченко Н. И., Семёнов С. Ф.* Система передачи гидрометеорологической информации, получаемой в бассейне реки Тиса, в городах Киев и Ужгород / Проблеми економічного та соціального розвитку регіону і практика наукового експерименту – Наук.-техн. зб.- Вип. № 17. - Київ-Ужгород-Ніредьгаза, 2001.- С. 97 - 104.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 08.10.2001