

**Е.В. Головань<sup>1</sup>, В.Н. Харченко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: holovan.helen@gmail.com

<sup>2</sup>Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт радиоэлектронной техники»

3а, ул. Динамовская, Харьков, 61023, Украина

## Концепция построения перспективной системы метеорной радиосвязи

**Предмет и цель работы.** Представлена концепция построения перспективной системы метеорной радиосвязи (СМР), которая позволяет обеспечить повышение пропускной способности, помехозащищенности и скрытности функционирования системы.

**Методы и методология работы.** Предлагаемые методы и технические решения включают выбор топологии сети метеорной радиосвязи, применение кодового разделения каналов, использование программно-управляемых интеллектуальных антенн (SMART-антенн) и методов адаптации к изменяющимся условиям функционирования.

**Результаты работы.** Предложены варианты топологий сетей метеорной радиосвязи, обеспечивающие возможность одновременного доступа абонентских станций (АС) к нескольким базовым станциям (БС) сети, где на АС и БС используются SMART-антенны. Показано, что при программном наведении таких антенн следует учитывать сезонное изменение плотности радиантов спорадического метеорного комплекса. При этом максимумы диаграмм направленности (ДН) должны быть ориентированы на области пространства, где появление подходящих метеорных следов наиболее вероятно, а «нули» ДН должны быть ориентированы в направлении источников помех. Показана целесообразность использования сигналов с прямым расширением спектра для борьбы с интерференционными замираниями и предложены методы цифровой обработки таких сигналов.

**Заключение.** Показано, что предлагаемую концепцию повышения пропускной способности, помехозащищенности и скрытности функционирования СМР, а также ее последующую модернизацию целесообразно реализовать на основе использования программно-определяемой радиосистемы (Software Defined Radio, SDR). Ил. 8. Библиогр.: 24 назв.

**Ключевые слова:** метеорная радиосвязь, пропускная способность, радиант, спорадический метеороид, помехозащищенность, скрытность функционирования, топология сети, SMART-антенна, кодовое разделение каналов, сигнал с прямым расширением спектра, режекция узкополосных помех, SDR-технология.

В настоящее время во многих развитых странах (США, Канада, Норвегия, Япония и др.) разрабатываются, совершенствуются и применяются системы связи, основанные на использовании метеорного радиоканала [1]. Метеорная радиосвязь используется в труднодоступных и отдаленных районах, на флоте, в системах автоматического дистанционного сбора данных в интересах гидрометеорологических служб и экологического мониторинга, в системах предупреждения о чрезвычайных ситуациях и стихийных бедствиях, для диспетчеризации транспортных

средств и сбора информации о местоположении движущихся объектов (айсбергов, буев и др.), а также для обеспечения высокоточной синхронизации разнесенных в пространстве эталонов времени и частоты. Использованию метеорной радиосвязи уделяют внимание военные, дипломатические и специальные ведомства, поскольку метеорный радиоканал обеспечивает скрытность передачи информации и его очень сложно запеленговать и подавить.

Системы метеорной связи широко используются в интересах министерства обороны США

и в НАТО. Система метеорной связи ВВС США, предназначенная для повышения устойчивости работы наземных средств управления и обеспечения непрерывности управления в период нанесения противником ядерного удара и после него, рассматривается в настоящее время как основное средство управления стратегическими силами. В интересах Объединенной системы аэрокосмической обороны США и Канады (*North American Aerospace Defense Command, NORAD*), для управления силами ПВО развернуты две системы метеорной радиосвязи, расположенные на Аляске и в штате Вашингтон. Дальнейшее развитие метеорной связи ВВС США направлено на интеграцию этих систем в единую систему метеорной связи, которая охватит все основные оперативные центры.

Метеорная связь в Украине недостаточно изучена и не нашла должного практического применения. В тоже время, несмотря на прерывистость связи и относительно небольшую среднюю пропускную способность (до нескольких килобит в секунду), метеорная связь имеет ряд преимуществ, выгодно отличающих ее от других традиционных видов связи:

- значительная дальность действия радиоканала (до 2000 км) и отсутствие так называемых «мертвых зон» позволяют обеспечить информационный обмен на больших территориях и ставят метеорную связь в один ряд с другими видами «загоризонтной» связи;

- геометрия распространения радиоволн, рассеянных на метеорном следе, обеспечивает прием сигнала от конкретного метеора в ограниченной зоне, что позволяет, с одной стороны, одновременно обслуживать большое количество корреспондентов на одной рабочей частоте, с другой – дает предпочтение системам метеорной связи по электромагнитной совместимости, скрытности функционирования и помехозащищенности;

- относительно малые энергетические затраты при передаче сигналов по метеорному каналу, обусловленные низким уровнем шумов и малым поглощением в ионосфере, обеспечивают малые габаритные размеры и низкое энергопотребление аппаратуры связи;

- устойчивость к естественным и искусственным ионосферным возмущениям позволяет работать в северных широтах. Данное

свойство представляет особый интерес в чрезвычайных и критических ситуациях, когда метеорные системы могут оказаться единственными, способными в короткий срок обеспечить связь с экспедициями в Арктике и Антарктике.

Наряду с указанными достоинствами, системы метеорной связи обладают такими недостатками, как относительно низкая скорость передачи информации и большое время ожидания появления метеорного следа, имеющего точку зеркального отражения. Это, в свою очередь, приводит к снижению пропускной способности системы и задержке доставки информации до потребителя, что может оказаться неприемлемым для некоторых практических приложений.

Современные технологии построения телекоммуникационных систем, основанные на использовании интеллектуальных антенн (*SMART-антенн*), адаптации радиоканала к условиям функционирования и применении программно-определяемой радиосистемы (*Software Defined Radio, SDR*), открывают новые возможности повышения эффективности системы метеорной радиосвязи (СМР). Этому же способствует существенный прогресс в области информационных технологий и микросхемотехники.

Цель работы – разработка концепции построения системы метеорной связи, которая обеспечивает увеличение пропускной способности, сокращение времени ожидания соединения, увеличение количества обслуживаемых системой абонентов (периферийных станций сети), повышение помехозащищенности и скрытности функционирования системы.

Концепция предполагает:

- выбор топологии сети, обеспечивающей необходимое покрытие и возможность одновременного доступа абонентских станций СМР к нескольким базовым станциям (БС) сети, что сокращает время ожидания появления ионизированного метеорного следа, имеющего точку зеркального отражения, и, соответственно, увеличивает пропускную способность системы;

- возможность дополнительной защиты от преднамеренных и непреднамеренных помех для БС, поскольку она является наиболее критичным элементом сети метеорной радиосвязи. Эта возможность может быть реализована

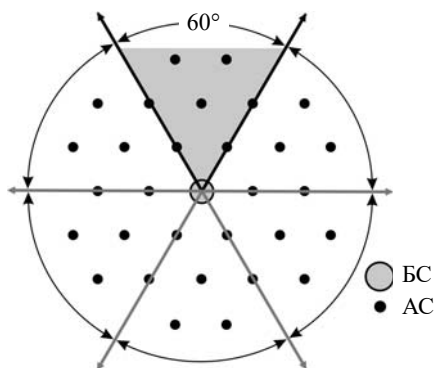


Рис. 1. СМР с топологией типа «звезда» для АС, равномерно распределенных по площади

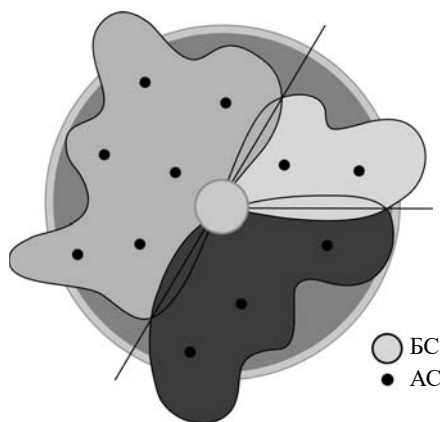


Рис. 2. СМР с топологией типа «звезда» для АС, неравномерно распределенных по площади, с тремя секторами формирования ДН [4]

на основе использования программно-управляемых антенн, обеспечивающих необходимое покрытие и адаптацию к изменяющимся условиям функционирования системы;

- использование на абонентских станциях (АС) антенны с управляемой или коммутируемой диаграммой направленности (ДН) для наведения на «горячие зоны» – области пространства, где появление подходящих метеорных следов наиболее вероятно (положение этих зон зависит от географического положения БС и АС, а также времени года и суток). Это позволит сократить время ожидания соединения и увеличить пропускную способность СМР;

- применение сигналов с прямым расширением спектра и методов их обработки, позволяющих противостоять интерференционным замираниям, возникающим на интервале наблюдения при дефрагментации метеороида и диффузном расширении метеорного следа, а также воздействию сосредоточенных по спектру помех. Это обеспечит повышение помехоустой-

чивости и, как следствие, пропускной способности канала связи.

Поскольку любая правильно спроектированная современная система связи должна допускать последующую модернизацию на интервале жизненного цикла без изменения схемотехнических решений, управление системой, протоколы передачи, а также методы формирования и обработки сигналов целесообразно реализовать на основе технологий *SDR*.

### 1. Топология сети метеорной радиосвязи.

В Рекомендации МСЭ-Р *F.1113* [2] в качестве примера приводится СМР с топологией сети типа «звезда» с центральной (базовой) станцией, которая рассчитана на обслуживание до 1000 удаленных станций в зоне покрытия радиусом до 2000 км. Предполагается, что каждая из удаленных станций может связываться с любым количеством других удаленных станций через центральную станцию, используя полудуплексный пакетный протокол с автоматическими повторными передачами пакетов при наличии ошибок. Указывается, что более крупные сети могут быть построены с использованием нескольких промежуточных станций, между которыми установлено соединение. Такая сеть может быть переконфигурирована для любого заданного количества АС.

На рис. 1 представлена СМР с топологией типа «звезда», включающая одну БС и 30 АС, равномерно распределенных в круге заданного радиуса («плотная упаковка»). Для покрытия зоны размещения АС антенная система БС должна формировать круговую в азимутальной плоскости ДН, которая при заданной мощности передатчика способна обеспечить необходимый энергетический потенциал метеорной радиолинии для обмена информацией с АС. Такая ДН, в принципе, может быть создана с использованием на БС сложной фазированной антенной решетки (ФАР) [3].

Конструктивно ФАР может быть несколько упрощена, если построить ее из нескольких более простых решеток, каждая из которых обслуживает свой сектор зоны размещения АС. На рис. 1 такой сектор равен  $60^\circ$ , и, следовательно, на БС необходимо иметь шесть соответствующих ФАР.

При неравномерном распределении АС по территории их размещения могут быть исполь-

зованы SMART-антенны с цифровым формированием ДН. На рис. 2 показана СМР с топологией типа «звезда», где в трех секторах формируется ДН заданной формы, с требуемым коэффициентом направленного действия (КНД), который определяется количеством элементов ФАР и типом применяемых элементарных антенн [3, 4]. Секторальное построение обеспечивает дополнительное преимущество – возможность в каждом из них использовать свою форму зондирующего сигнала. Это обеспечивает возможность наращивания количества АС в сети.

Для сокращения времени ожидания появления ионизированного метеорного следа, имеющего точку зеркального отражения, необходимо обеспечить возможность одновременного доступа АС к нескольким БС сети, что увеличивает пропускную способность системы. Топология размещения для трех и четырех БС при 30 АС показана на рис. 3.

При трех БС АС, находящиеся в «зоне А», имеют принципиальную возможность одновременно принимать три зондирующих сигнала, а в трех «зонах В» – два или три зондирующих сигнала, что при соответствующей стратегии маршрутизации существенно сокращает время ожидания метеорного следа и увеличивает пропускную способность СМР. Очевидно, что при четырех БС время ожидания еще более сокращается и, кроме того, возможно снижение требований к окончательному оборудованию значительного количества абонентов.

Связь между БС может осуществляться по метеорному радиоканалу, но его пропускной способности может оказаться недостаточно для сбора всей информации в одном пункте. Целесообразно обеспечить дополнительные каналы связи между БС – например, спутниковые радиоканалы. Это позволит получить доступ к информации в любом пункте размещения БС и увеличит связность сети.

**2. Защита БС от помех.** Поскольку БС является наиболее критичным элементом СМР, необходимо предусмотреть возможность дополнительной защиты от преднамеренных и непреднамеренных помех. При использовании адаптивных ФАР (АФАР) существует возможность программного формирования «нулей» ДН в направлении источников помех [3,

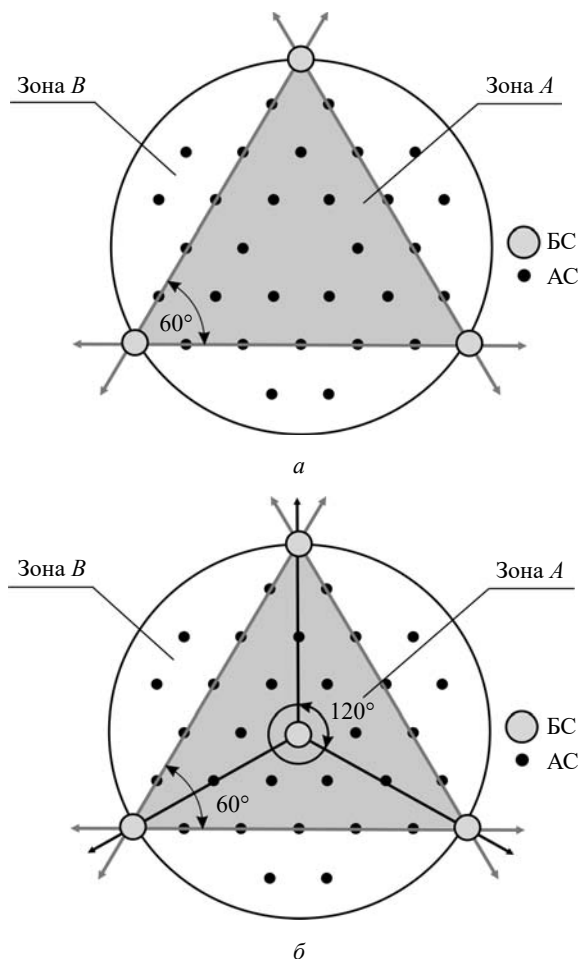


Рис. 3. СМР с тремя (а) и четырьмя (б) БС

5, 6]. При этом используются дополнительные (компенсационные) антенны с шириной ДН 80...90°, расположенные вблизи основной антенны БС. Коэффициенты усиления компенсационных антенн должны быть одинаковыми и не менее чем на 2 дБ превышать уровень боковых лепестков ДН основной антенны.

Для автоматического формирования «нулей» в направлении источника помех используется программно-управляемый автокомпенсатор помех (АКП). Он представляет собой устройство автоматического регулирования с корреляционными обратными связями, которыми охвачены все каналы. Входами АКП являются выходы усилителя высокой частоты (УВЧ) основного канала и выходы УВЧ четырех компенсационных антенн, а выходом – сумматор (через направленный ответвитель). Управляющее напряжение обеспечивает регулировку коэффициентов передачи компенсационных каналов таким образом, чтобы при суммировании выхо-

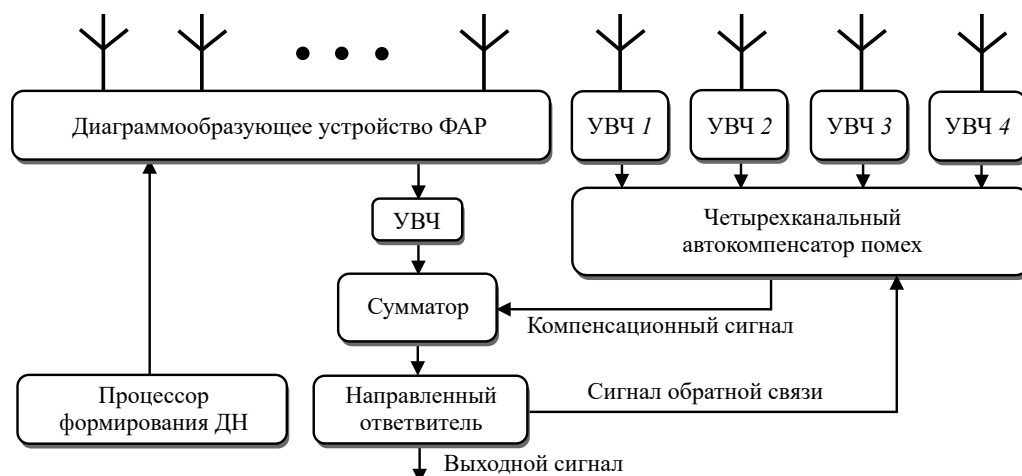


Рис. 4. Структурная схема системы автоматического формирования «нулей» ДН в направлении источника помех

дов всех каналов мощность помехи была минимальной. Структурная схема системы автоматического формирования «нулей» ДН в направлении источника помех представлена на рис. 4.

**3. Управление антеннами АС.** Существенно сократить время ожидания соединения и увеличить пропускную способность СМР возможно при использовании на АС антенны с управляемой или коммутируемой ДН [7–9].

Принцип построения ФАР с управлением лучом иллюстрируется рис. 5.

Для абонентской станции СМР может оказаться достаточным применение двух горизонтально расположенных элементарных антенн. В качестве таких антенн могут использоваться антенны Уда–Яги (директорные антенны), крест-вибраторы, логопериодические или спиральные антенны [10]. Следует иметь в виду, что под воздействием эффекта Фарадея происходит поворот плоскости поляризации при прохождении радиоволн через  $D$ -область и нижнюю часть  $E$ -области ионосферы, что делает применение в СМР антенн с круговой поляризацией более предпочтительным, особенно в дневное время.

Для обеспечения максимальной пропускной способности при разработке программы наведения антенн АС на «горячие зоны» необходимо учитывать сезонные изменения плотности распределения и значения радиантов, их суточные вариации, а также географическое положение, протяженность и ориентацию радиолинии [10–13]. Для умеренных широт Северного полушария положительный эффект от наведе-

ния антенн АС наблюдается, если выполняются следующие рекомендации:

- на трассах, идущих преимущественно с востока на запад, антенны БС и АС необходимо направлять так, чтобы главные оси ДН пересекались к северу от трассы с 00.00 до 12.00 по местному времени, к югу – с 12.00 до 24.00;
- на трассах, идущих преимущественно с севера на юг, антенны БС и АС должны быть направлены с 18.00 до 06.00 по местному времени к западу от направления трассы, с 06.00 до 18.00 – к востоку.

Наибольшие суточные вариации наблюдаются на экваторе, наименьшие – на полюсах. Наибольшие сезонные вариации – на полюсах, наименьшие – на экваторе.

При заданном географическом положении БС оптимальное наведение антенн АС и разработка соответствующего программного обеспечения потребуют учета сезонного и суточного распределения радиантов спорадических метеороидов для каждой АС с указанными координатами. Исходные данные могут быть получены на основании взятых за основу моделей и результатов экспериментальных исследований [14].

Используемая в настоящее время карта распределения радиантов шести основных источников спорадического метеорного комплекса в гелиоцентрической эклиптической системе координат показана на рис. 6.

На рис. 7 в качестве примера представлена карта сезонного изменения плотности радиантов спорадического метеорного комплекса

в апексной плоскости гелиоцентрической эллиптической системы координат, полученная с помощью канадского радиолокатора метеорных орбит *CMOR* (*Canadian Meteor Orbit Radar*). Подробная информация о *CMOR* может быть найдена в публикациях [15, 16]. Измерения проводились на частоте 29,85 МГц для пяти спорадических источников, видимых в Северном полушарии в 2005–2006 гг. Для Южного полушария аналогичные результаты получены при использовании метеорного радиолокатора *SAAMER* (*Southern Argentina Agile Meteor*), развернутого в Рио-Гранде (53,8° ю.ш.) в мае 2008 г. [17].

Для оптимального наведения антенны АС на «горячую зону» необходимо установить, какие источники радиантов для координат центра радиолинии АС – ВС являются доминирующими на дату проведения сеанса связи, и определить преобладающие значения радиантов метеороидов с учетом местного времени [11–13]. Вычисление преобладающих радиантов спорадических метеороидов может быть выполнено путем последовательного преобразования координат от гелиоцентрической эллиптической системы к топоцентрической. В процессе функционирования СМР и набора соответствующей статистики исходные данные для программного наведения могут уточняться.

**4. Применение широкополосных шумоподобных сигналов для метеорных радиолиний.** Увеличить пропускную способность, помехозащищенность и скрытность функционирования СМР позволяет использование сигналов с прямым расширением спектра – широкополосных шумоподобных сигналов (ШШС), а также методов их обработки, оптимальных в условиях воздействия негауссовских помех [18, 19]. Показано [11], что использование ШШС с шириной спектра более 10 МГц в метеорном радиоканале ослабляет воздействие интерференционных замираний, которые возникают на интервале наблюдения при фрагментации метеороида, диффузном расширении метеорного следа и его искривлении под воздействием ветра, а частотная избыточность обеспечивает возможность режекции узкополосных помех в спектре сигнала [18–20].

Для оценки эффективности применения ШШС рассмотрим влияние функции рассеяния

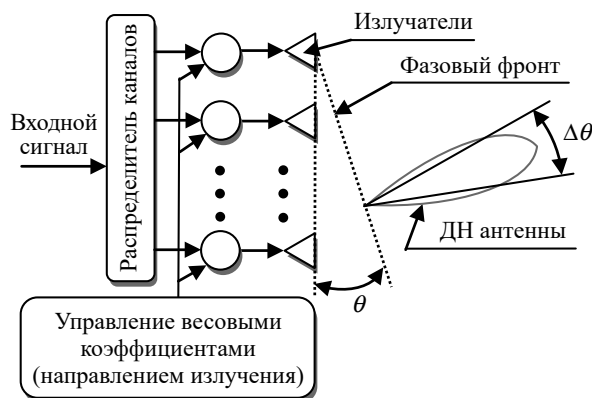


Рис. 5. ФАР с управлением лучом

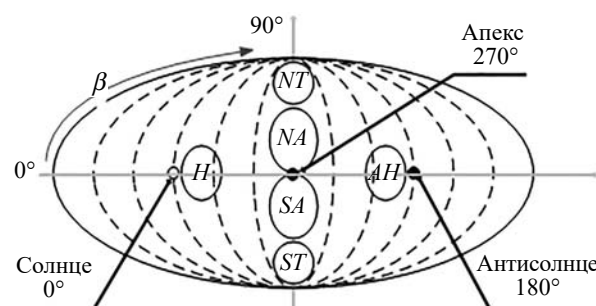


Рис. 6. Карта распределения радиантов шести основных источников спорадического метеорного комплекса, где  $\beta$  – эклиптическая широта: *H* – гелион; *AH* – антигелион; *NA* – северный апекс; *SA* – южный апекс; *NT* – северный тороидальный; *ST* – южный тороидальный

сигнала на ионизированном метеорном следе на достоверность передачи информации. Известно, что в радиоканалах с рассеянием сигналов по запаздыванию можно реализовать неявное разнесение, обеспечивающее эквивалентную кратность разнесения  $N$ , определяемую соотношением [22, 23]

$$N = 1 + \Delta\tau \Delta F_c, \quad (1)$$

где  $\Delta\tau$  – интервал эффективного рассеяния по запаздыванию;  $\Delta F_c$  – ширина спектра сложного сигнала.

На рис. 8, а представлена функция рассеяния  $S(\tau)$  расширяющегося под действием амбиполярной диффузии метеорного следа в различные моменты времени, рассчитанная на основании радиофизической модели [11] для следующих параметров метеорного следа и радиолинии: масса метеороида  $m = 0,1$  г, скорость  $v = 40$  км/с, длина волны  $\lambda = 10$  м, протяженность радиолинии  $L = 1000$  км.

На рис. 8, б для сопоставления показано распределение профилей импульсных откликов,

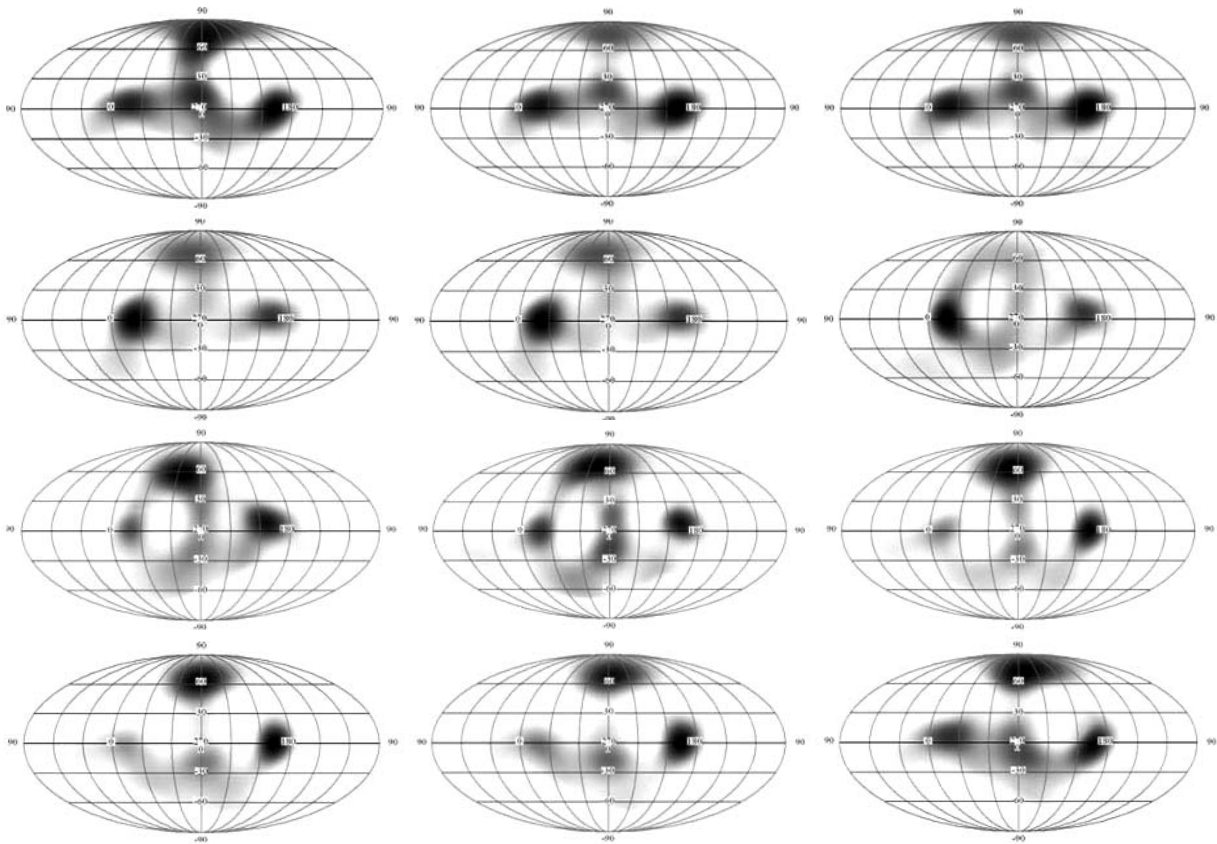


Рис. 7. Карта сезонного изменения плотности радиантов спорадического метеорного комплекса в апексной плоскости гелиоцентрической эллиптической системы координат

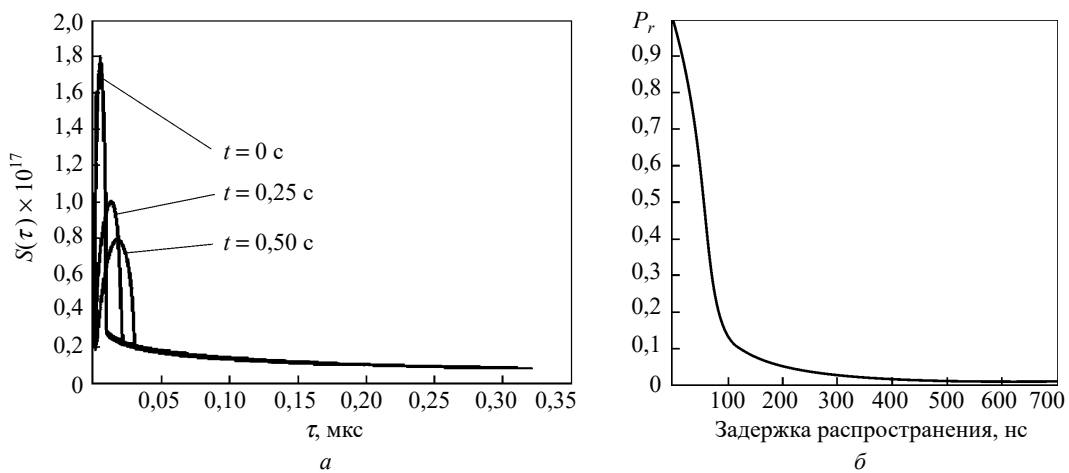


Рис. 8. Функция рассеяния  $S(\tau)$  метеорного следа при протяженности радиолинии 1000 км (а) и распределение профилей импульсных откликов при протяженности радиолинии 500 км (б)

собранных в канале метеорной связи протяженностью 500 км, представленное в Рекомендациях МСЭ-R P.843-1 [24]. Их анализ показывает, что для 12 % наблюдаемых недоуплотненных и 71 % переуплотненных следов наблюдались эффекты многолучевости (рассеяния). Как следует из рис. 8, б, в 90 % случаев среднеквадратичная задержка  $\Delta S$  составляет менее 100 нс и в 99 % случаев разброс задержек составляет менее 400 нс. Иногда наблюдался разброс задержек в интервале от 1,0 до 7,0 мкс, что могло существенно влиять на качество связи.

Если предположить, что  $\Delta S = 100$  нс, а ширина спектра сигнала  $\Delta F_c = 10$  МГц, то на ос-

Если предположить, что  $\Delta S = 100$  нс, а ширина спектра сигнала  $\Delta F_c = 10$  МГц, то на ос-

новании (1) получим эквивалентную кратность разнесения  $N = 2$ . Количественную оценку выигрыша в пропускной способности метеорного радиоканала аналитическими методами получить практически невозможно вследствие отсутствия необходимых статистических данных, но наличие выигрыша не вызывает сомнений.

**Выводы.** Концепция построения перспективной СМР, которая позволяет сократить время ожидания соединения, обеспечить повышение пропускной способности, помехозащищенности и скрытности функционирования, включает:

- выбор топологии СМР, обеспечивающей возможность одновременного доступа АС к нескольким БС сети;
- дополнительную защиту БС от преднамеренных и непреднамеренных помех, основанную на возможности программного формирования «нулей» ДН в направлении источников помех;

- использование на АС антенны с управляемой или коммутируемой ДН для наведения на области пространства, где появление подходящих метеорных следов наиболее вероятно;

- применение кодового разделения каналов и больших ансамблей с хорошими взаимокорреляционными свойствами и ШПС, которые позволяют противостоять интерференционным замираниям, возникающим на интервале наблюдения следа;

- режекцию узкополосных помех в спектре сигналов с прямым расширением спектра.

Указано, что построению и последующей модернизации системы будет способствовать применение SDR-технологий, позволяющих внедрять новые методы обработки сигналов и протоколы передачи информации, осуществлять унификацию и последующую модернизацию практически всех элементов СМР без существенного изменения схемотехнических решений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jernovics J.P. Meteor Burst Communications: an additional means of long-haul communications. URL: <https://www.globalsecurity.org/space/library/report/1990/JJP.htm>
2. Recommendation ITU-R F.1113 Radio systems employing meteor-burst propagation (Question ITU-R 157/9). URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/a2b5/b61d1b6db51b8e2973bebe6d4a32703e40ca.pdf>
3. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. *Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию*. Пер. с англ. под ред. В.А. Лексаченко. Москва: Радио и связь, 1986. 448 с.
4. Слюсар В.И. SMART – антенны пошли в серию. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2004. № 2. С. 62–65.
5. Уидроу Б., Стирнз С. *Адаптивная обработка сигналов*. Пер. с англ. под ред. В.В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
6. Лосев Ю.И., Бердников А.Г., Гойхман Э.Ш., Сизов Б.Д. *Адаптивная компенсация помех в каналах связи*. Под ред. Ю.И. Лосева. Москва: Радио и связь, 1988. 208 с.
7. Larsen J.D., Mawrey R.S., Weitzen J.A. The use of antenna beam steering to improve the performance of meteor burst communications systems. *Military Communications Conf. 1992. (MILCOM '92) Conf. Record. Communications - Fusing Command Control and Intelligence*. (San Diego, CA, USA, USA, 11–14 Oct. 1992). San Diego: IEEE, 1992. Vol. 1. P. 12–17. DOI: 10.1109/MILCOM.1992.244100.
8. Mawrey, R.S. Weitzen J.A. Measured performance of meteor burst systems using antenna beam steering. *IEEE Trans. Commun.* 1995. Vol. 43, Iss. 234. P. 1467–1476. DOI: 10.1109/26.380196.
9. Вендик О.Г., Парнес М.Д. *Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию*. Под ред. Л.Д. Бахраха. Москва: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.
10. Способ метеорной радиосвязи (варианты и система для его осуществления): пат. 2406, Республика Казахстан: МПК: Н04В 7/22 / И.Д. Козин, В.Е. Зеленков, И.В. Васильев, А.И. Кипшакбаев. № 200000093; заявл. 13.01.2000; опубл. 25.04.2002, База патентов Евразийского Союза.
11. Харченко Е.В. *Модель метеорного радиоканала, основанная на решении дифракционной задачи рассеяния сигнала на ионизированном следе*: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, 2013. 164 с.
12. Харченко Е.В. Метод расчета областей наиболее вероятного появления метеорных следов, имеющих точку зеркального отражения. *Радиотехника: науч.-техн. сб. ХНУРЭ*. Харьков, 2011. Вып. 166. С. 186–192.
13. Эшлеман В.Р., Млоднокси Р.Ф. Характеристики направленности метеорного распространения радиоволн. *Метеорная связь на УКВ*. Москва, 1961. С. 117.
14. Jones J. Meteoroid Engineering Model – Final Report, SEE/CR-2004-400, June 2004. URL: [https://www.nasa.gov/pdf/192930main\\_SEE/CR-2004-400\\_MOD\\_MEM.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/192930main_SEE/CR-2004-400_MOD_MEM.pdf)
15. Jones J., Brown P., Ellis K.J., Webster A.R., Campbell-Brown M., Krzemenski Z., and Weryk R.J. The Canadian Meteor Orbit Radar: system overview and preliminary results. *Planet. Space Sci.* 2005. Vol. 53, Iss. 4. P. 413–421. DOI: 10.1016/j.pss.2004.11.002.



16. Webster A.R., Brown P.G., Jones J., Ellis K.J., and Campbell-Brown M. The Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR). *Atmos. Chem. Phys.* 2004. Vol. 4, Iss. 3. P. 1181–1201. DOI: 10.5194/acp-4-679-2004.
17. Younger P.T., Astin I., Sandford D.J., and Mitchell N.J. The sporadic radiant and distribution of meteors in the atmosphere as observed by VHF radar at Arctic, Antarctic and equatorial latitudes. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27, Iss. 7. P. 2831–2841.
18. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И., Урядников Ю.Ф., Дергачев Ю.А., Сулиманов А.А. *Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами*. Под ред. Г.И. Тузова. Москва: Радио и связь, 1985. 264 с.
19. Варакин Л.Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами*. Москва: Радио и связь, 1985. 384 с.
20. Турин Дж. Л. Введение в широкополосные методы борьбы с многолучевостью распространения радиосигналов и их применение в городских системах цифровой связи. *Тр. Ин-та инж. электротехн. радиоэлектрон. (ТИИЭР)*. 1980. Т. 68, № 3. С. 30–58.
21. Torrieri D. *Principles of Spread-spectrum communication systems*. N.Y.: Springer, 2005. 444 p.
22. Кеннеди Р. *Каналы связи с замираниями и рассеянием*. Пер. с англ. под ред. И.А. Овсевича. Москва: Сов. радио, 1973. 304 с.
23. Ван Трис Г. *Теория обнаружения, оценок и модуляции*: в 4-х т. Т. 3. Обработка сигналов в радио- и гидролокации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех. Пер. с англ. под ред. В.Т. Горяинова. Москва: Сов. радио, 1977. 664 с.
24. ITU-R Recommendations P.843-1: Communication by meteor-burst propagation [pdf]. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.843-1-199708-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.843-1-199708-1!!PDF-E.pdf)

Стаття надійшла 21.12.2019

## REFERENCES

1. Jernovics, J.P., 1990. Meteor Burst Communications: an additional means of long-haul communications [on-line]. Available at: <https://www.globalsecurity.org/space/library/report/1990/JJP.htm>
2. Recommendation ITU-R F.1113. Radio systems employing meteor-burst propagation (Question ITU-R 157/9) [pdf]. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/a2b5/b61d1b6db51b8e2973bebe6d4a32703e40ca.pdf>
3. Monzingo, R.A., Miller, T.U., 1986. *Adaptive antenna arrays: Introduction to theory*. Translated from English and ed. by V.A. Leksachenko. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
4. Slyusar, V.I., 2004. SMART-Antennas are Now in High Volume Production. *Electronics: STB*, 2, pp. 62–65 (in Russian).
5. Widrow B., Stearns S., 1989. *Adaptive signal processing*. Translated from English and ed. by V.V. Shakhgil'dyan. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
6. Losev, Yu.I. ed., Berdnikov, A.G., Gohjman, E.Sh., Sizov, B.D., 1988. *Adaptive interference compensation in communication channels*. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
7. Larsen, J.D., Mawrey, R.S., Weitzen, J.A., 1992. The use of antenna beam steering to improve the performance of meteor burst communications systems. In: *Military Communications Conf. 1992 (MILCOM '92)*. Conf. Record. Communications - Fusing Command Control and Intelligence. San Diego, CA, USA, USA, 11–14 Oct. 1992. San Diego: IEEE. 1, pp. 12–17. DOI: 10.1109/MILCOM.1992.244100.
8. Mawrey, R.S., Weitzen, J.A., 1995. Measured performance of meteor burst systems using antenna beam steering. *IEEE Trans. Commun.*, 43(234), pp. 1467–1476. DOI: 10.1109/26.380196.
9. Vendik, O.G., Parnes, M.D., 2002. *Electric Scanning Antennas (Introduction to Theory)*. Ed. by L.D. Bahrah. Moscow: SAJNS-PRESS (in Russian).
10. Kozin, I.D., Zelenkov, V.E., Vasilev, I.V., Kipshakbaev, A.I., 2002. Method for meteor radio communication (options and implementation system). Republic of Kazakhstan. Pat. 2406 (in Russian).
11. Kharchenko, H.V., 2013. *The model of meteor radio channel based on the solution of the diffraction problem of scattering on ionized trail*: PhD thesis ed., Kharkiv: O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU (in Russian).
12. Kharchenko, H.V., 2011. A method for calculating the areas of the most likely occurrence of meteor trails with specular reflection point. In: *Radiotekhnika*. Kharkov: NURE Publ. 166, pp. 186–192 (in Russian).
13. Eshleman, V.R., Mlodnoski, R.F., 1961. Directivity characteristics of meteoric propagation of radio waves. *Comp. Meteor communication on VHF*, p. 117 (in Russian).
14. Jones, J., 2004. Meteoroid Engineering Model – Final Report, SEE/CR-2004-400, June 2004 [pdf]. Available at: [https://www.nasa.gov/pdf/192930main\\_SEECR-2004-400\\_MOD\\_MEM.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/192930main_SEECR-2004-400_MOD_MEM.pdf)
15. Jones, J., Brown, P., Ellis, K.J., Webster, A.R., Campbell-Brown, M., Krzemenski, Z., and Weryk, R.J., 2005. The Canadian Meteor Orbit Radar: system overview and preliminary results. *Planet. Space Sci.*, 53(4), pp. 413–421.
16. Webster, A.R., Brown, P.G., Jones, J., Ellis, K.J., and Campbell-Brown, M., 2004. The Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR). *Atmos. Chem. Phys.*, 4(3), pp. 1181–1201. DOI: 10.5194/acp-4-679-2004.
17. Younger, P.T., Astin, I., Sandford, D.J., and Mitchell, N.J., 2009. The sporadic radiant and distribution of meteors in the atmosphere as observed by VHF radar at Arctic, Antarctic and equatorial latitudes. *Ann. Geophys.*, 27(7), pp. 2831–2841.
18. Tuzov, G.I. ed., Sivov, V.A., Prytkov, V.I., Uryadnikov, Yu.F., Dergachev, Yu.A., Sulimanov, A.A., 1985. *Interference immunity of radio systems with complex signals*. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
19. Varakin, L.E., 1985. *Communication systems with noise-like signals*. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
20. Turin, D.L., 1980. Introduction to broadband methods to combat multipath propagation of radio signals and their application in urban digital communication systems. *Proc. IEEE*, 68(3), pp. 328–353. DOI: 10.1109/PROC.1980.11645.
21. Torrieri, D., 2005. *Principles of Spread-spectrum communication systems*. N.Y.: Springer.
22. Kennedy, R., 1973. *Fading and scattering communication channels*. Translated from English and ed. by I.A. Ovseevich. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).

23. Van Tris, G., 1977. *The theory of detection, estimation and modulation*. Vol. 3. Signal processing in radio and sonar and the reception of random Gaussian signals against a background of interference. Translated from English and ed. by V.T. Goryainov. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
24. ITU-R Recommendations P.843-1: Communication by meteor-burst propagation [pdf]. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.843-1-199708-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.843-1-199708-I!!PDF-E.pdf)

Received 21.12.2019

O.V. Holovan<sup>1</sup>, V.M. Kharchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>O.Ya. Usikov IRE NASU

12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

<sup>2</sup>State enterprise «Scientific research institute of radio electronic techniques»

3a, Dynamivska str., Kharkiv, 61023, Ukraine

#### A BUILDING CONCEPT OF A PROMISING METEOR-BURST COMMUNICATION SYSTEM

**Subject and purpose.** The paper presents a building concept of a promising meteor-burst communication system with enhanced bandwidth, noise immunity and covert operation of the system.

**Methods and methodology.** The proposed methods and technical solutions include selection of meteor-burst communication network topologies and employment of code division multiplexing and software-controlled intelligent antennas (SMART antennas) with adaptive techniques in view of varying operating conditions.

**Results.** A meteor-burst communication network has been proposed in several topology variants providing a means of a simultaneous assess of subscriber stations to several base stations of the network, with both subscriber and base stations employing SMART antennas. It has been shown that the software-controlled pointing of these antennas should take into account seasonal changes in the radiant density of the sporadic meteor complex, implying that the radiation pattern maxima should be placed in the most probability areas of the appropriate meteor tracks, with pattern nulls located on the interference source directions. Signals with direct sequence spread spectrum have proved themselves well against interference fading. For these signals, digital processing techniques have been suggested.

**Conclusion.** It has been shown that the proposed concept of enhanced bandwidth, noise immunity and covert operation of the meteor-burst communication system, as well as its subsequent refinement, is expedient to implement through the use of Software Defined Radio, SDR.

**Key words:** meteor-burst communication, bandwidth, radiant, sporadic meteoroid, noise immunity, covert operation, network topology, SMART antenna, code division multiplexing, signals with direct sequence spread spectrum, rejection of narrow-band interference, SDR technology.

O.B. Головань<sup>1</sup>, В.М. Харченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

<sup>2</sup>Державне підприємство «Науково-дослідний інститут радіоелектронної техніки»

3а, вул. Динамівська, Харків, 61023, Україна

#### КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ПЕРСПЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ МЕТЕОРНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

**Предмет і мета роботи.** Представлено концепцію побудови перспективної системи метеорного радіозв'язку (СМР), яка дозволяє забезпечити підвищення пропускної здатності, завадостійкості і прихованості функціонування системи.

**Методи і методологія роботи.** Запропоновані методи і технічні рішення передбачають вибір топології мережі метеорного радіозв'язку, застосування кодового поділу каналів, використання програмно-керованих інтелектуальних антен (SMART-антен) і методи адаптації до постійно змінюваних умов функціонування.

**Результати роботи.** Запропоновано варіанти топологій мереж метеорного радіозв'язку, що забезпечують можливість одночасного доступу абонентських станцій (АС) до декількох базових станцій (БС) мережі, де на АС і БС використовуються SMART-антени. Показано, що при програмному наведенні таких антен слід враховувати сезонну зміну щільності радіантів спорадичного метеорного комплексу. При цьому максимуми діаграм направленості (ДН) повинні бути орієнтовані на області простору, де поява відповідних метеорних слідів найбільш ймовірна, а «нулі» ДН мають бути орієнтовані в напрямку джерел завад. Показано доцільність використання сигналів з прямим розширенням спектра для боротьби з інтерференційними замираннями і запропоновано методи цифрового оброблення таких сигналів.

**Висновок.** Показано, що запропоновану концепцію підвищення пропускної здатності, завадостійкості і прихованості функціонування СМР, а також її подальшу модернізацію доцільно реалізувати на основі використання програмно-визначеної радіосистеми (Software Defined Radio, SDR).

**Ключові слова:** метеорний радіозв'язок, пропускна здатність, радіант, спорадичний метеороїд, завадостійкість, прихованість функціонування, топологія мережі, SMART-антена, кодове розділення каналів, сигнал з прямим розширенням спектра, режекція вузькосмугових завад, SDR-технологія.