

УДК 621.371.3

МЕТОДЫ АКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ МЕТЕОРНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОТ ПОМЕХ

У статті розглянуті проблеми, пов'язані з перешкодами, зумовленими зворотньо-похилим зондуванням. Представлені два методи, що дозволяють знизити вплив цих перешкод: метод з використанням декількох частот і метод з використанням декількох кодових послідовностей шумоподібного сигналу (ШПС). Також розглянуті основні вимоги до послідовності, що кодує ШПС, і обрана оптимальна послідовність

Ключові слова: метеор, метеорна радіолокація, іоносфера, завади, кореляція, послідовність, шумоподібний сигнал

В статье рассмотрены проблемы, связанные с помехами, обусловленными возвратно-наклонным зондированием. Представлены два метода, позволяющие снизить влияние этих помех: метод с использованием нескольких частот и метод с использованием нескольких кодовых последовательностей шумоподобного сигнала (ШПС). Также рассмотрены основные требования к кодирующей последовательности ШПС, и выбрана оптимальная последовательность

Ключевые слова: метеор, метеорная радиолокация, ионосфера, помехи, корреляция, последовательность, шумоподобный сигнал

И. Е. Антипов

Доктор технических наук, заведующий кафедрой*

E-mail: i_ant@mail.ru

Р. В. Шандренко

Аспирант*

E-mail: shandrenkoruslan@mail.ru

А. И. Шкарлет

Аспирант*

E-mail: adretta59@mail.ru

*Кафедра основ радиотехники

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Явление отражения радиоволн от ионизированных следов метеоров известно с 50-х годов 20-го века [1]. Оно лежит в основе метеорного радиоканала, который обладает рядом полезных свойств, таких как скрытность, пространственная избирательность и др. Изучение свойств метеорного распространения радиоволн осуществляется при помощи метеорных радиолокационных станций. В 70-е годы в Харькове были проведены наблюдения отражений радиосигнала от ионизированных следов метеоров. Специально для этих целей была создана метеорная автоматизированная радиолокационная система (МАРС). Реализованная в комплексе МАРС система защиты от помех показала свою эффективность при подавлении импульсных и периодических помех. В комплексе реализован метод защиты от помех возвратно-наклонным зондированием ионосферы (ВНЗ), основанный на значительном увеличении периода следования зондирующих импульсов. Но его применение приводит к уменьшению количества зарегистрированных метеоров.

Во время проведения измерений, особенно в летние месяцы, в периоды высокой солнечной активности уровень помех, обусловленных ВНЗ, настолько высок, что приводит к значительной потере информации о метеорах, вплоть до полного «забоя» приёмника.

Для успешного проведения измерений на усовершенствованном комплексе МАРС необходимо пред-

усмотреть эффективную защиту от подобных помех. Для того чтобы выработать такую эффективную защиту, рассмотрим более подробно механизм воздействия помех ВНЗ на приёмник сигналов, предназначенных для приёма метеорных отражений.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Как известно, метеорные следы возникают в диапазоне высот 80...105 км [1, 2]. Если угол места, под которым ориентирован максимум диаграммы направленности антенн РЛС составляет 30 градусов, то наклонная дальность до основной массы метеорных следов находится в пределах (150...300) км [3]. Количество метеорных отражений на других дальностях значительно меньше и для расчётов не принимаются.

ВНЗ обусловлено отражением метровых волн от сильно ионизированной ионосферы. Степень её ионизации определяет критический угол и, соответственно, дальность до отражающей области. Протяжённость отражающей области и уровень отражённого сигнала также могут быть различными. Наблюдаемая дальность возникновения ВНЗ может составлять от 900 до 2500 км, протяжённость отражающей зоны – до нескольких сотен километров. Интенсивность сигнала ВНЗ сопоставима с уровнем полезного (метеорного) сигнала. Возникновение помех класса ВНЗ, схематично изображено на рис. 1.

Помехи, вызванные ВНЗ, не представляли бы проблемы для метеорных наблюдений, если бы период следования зондирующих сигналов превышал 20 мс, что позволяло бы однозначно различать сигналы и помеху. При отражении сигнала от метеорного следа, возникает амплитудно-временная характеристика (АВХ), которая изображена на рис. 1. Анализируя форму АВХ, определяют основные характеристики метеорного следа, поэтому для точности исследований нужно обеспечить её целостность. Но время существования метеорного следа в среднем 300 мс, а время, в течение которого изменяется форма АВХ, – несколько миллисекунд, потому при периоде зондирования 20 мс будет невозможно получить точное описание АВХ.

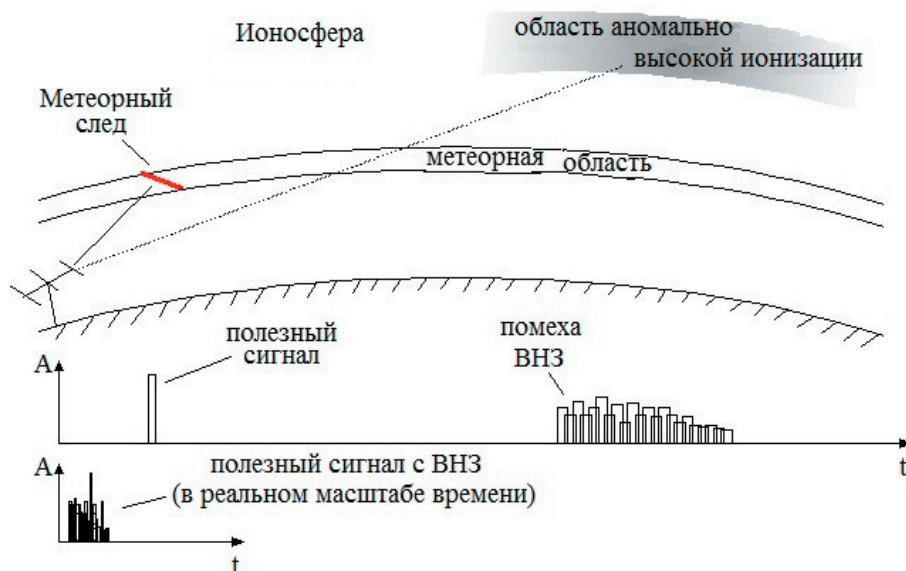


Рис. 1. Возникновение помех класса ВНЗ

В существующей системе МАРС период следования составляет 2 мс, что для указанных целей вполне достаточно. Но при таком периоде следования зондов сигналы, отражённые от метеорных следов, и помехи ВНЗ «накладываются» друг на друга, делая невозможной работу системы.

Таким образом, необходимо, сохранив небольшой период следования зондирующих импульсов, как-то образом различать метеорные сигналы и помехи ВНЗ.

Метеорные исследования и исследования ионосферы во многом пересекаются. Предложенные в статье методы разрабатываются специально для использования их в системе МАРС, но они также могут быть использованы и в метеорных радиолокационных станциях, работающих на основе импульсно-дифракционного метода. Целью системы МАРС является: на основе АВХ определить скорость, радиант, наклонную дальность до метеора и др. Определение этих характеристик возможно только при условии целостной АВХ [2]. Большинство мировых систем метеорной радиолокации используются для исследования атмосферы и ионосферы. То есть, для этих систем важно зафиксировать факт прихода метеорного вещества в атмосферу. Полный обзор систем метеорной радиолокации представлен в [4]. Так, например, японская система RISH

[5] помимо исследований атмосферы и ионосферы производит исследования движения метеорного следа в атмосфере. В [6] показаны результаты исследований, на которых видно, что радиолокационная станция фиксирует только факт наличия метеорного вещества в атмосфере.

Для таких исследований высокая точность результата работы МРЛС не важна, а, следовательно, не было попыток её увеличить. Методы защиты МРЛС от помех класса ВНЗ существуют, и такой метод, как было сказано выше, был использован на МАРС. Этот метод был основан на увеличении периода следования импульсов, в результате чего уменьшалась полнота данных. Предложенные в статье методы направлены

на увеличение точности результатов метеорных исследований и, следовательно, на увеличение качества и объема информации о метеорных исследованиях.

Цель исследований состоит в разработке методов активной защиты МАРС от помех класса ВНЗ и выбора наиболее подходящего из них.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- определить требования к методам активной защиты МАРС от помех класса ВНЗ;
- разработать методы активной защиты;
- проанализировать и выбрать наиболее подходящий метод.

3. Метод с использованием нескольких частот

Метод с использованием нескольких частот может быть реализован следующим образом. Несущая частота каждого очередного импульса должна отличаться от частоты предыдущего импульса. При этом приёмник должен быть в каждый момент времени настроен на приём «последнего» излучённого импульса. Это позволит ему принимать сигналы только с небольших дальностей и избавиться от удалённых помех.

Оценим количество необходимых частот. Если максимальная дальность до отражающей области ионосферы составляет около 2500 км, то при периоде основной последовательности 2 мс (измеряемая дальность 300 км), импульсы, излучённые более 10 периодов назад, уже не представляют опасности в плане создания помех. Поэтому период изменения частот должен составлять 20 мс (дальность 3000 км), что потребует 10 различных частот.

Для реализации такого алгоритма потребуется согласованное изменение частоты настройки передатчика и приёмника, а также способность усилителя мощности и антенны одинаково эффективно работать на всех предусмотренных частотах. Это приводит к мысли, что частотный разнос между выбранными частотами не должен быть слишком большим. Не должен быть он

большим и с точки зрения отражения от метеорного следа, т. к. эффективность отражения (согласно [7]) уменьшается как

$$P \sim \frac{1}{f^{2.4}}. \tag{1}$$

Поэтому наиболее рационально будет использовать частоты, расположенные максимально близко друг к другу. Их частотный разнос должен определяться шириной спектра излучаемого сигнала.

Дальнейший анализ задачи показывает, что использование 10 различных частот представляет собой достаточно серьёзную техническую и организационную сложность. Поэтому желательно минимизировать количество используемых частот и путь для этого есть. Если вернуться к исходному алгоритму (1 частота) то, действительно, в каждый момент времени приёмник способен принимать 10 различных импульсов, отражённых от объектов на 10 различных дальностях. При этом один из них полезный (метеорный), а опасность могут представлять только 3–4 из оставшихся 9, потому что протяжённость ионизированной области не превышает 1200 км. Это даёт основание полагать, что методом оптимальной коммутации количество частот может быть уменьшено до 4–5.

Существующие в настоящее время способы цифрового формирования и обработки сигналов на современной элементной базе, безусловно, позволят решить сформулированную задачу.

4. Метод с использованием шумоподобных сигналов

Другим вариантом защиты от помех является использование кодового разделения сигналов. Реализовать такой механизм возможно, используя в качестве сигнала сложный широкополосный сигнал (ШПС). Как было сказано выше, для нормальной работы системы требуется выбрать 10 сигналов, которые будут отличаться друг от друга. Прием ШПС осуществляется с помощью корреляционной обработки, а, следовательно, требуется выбрать 10 сигналов с низкой степенью корреляции друг с другом. Подобный механизм применяется в системе глобального позиционирования GPS, там используется 1023-ти позиционный сигнал [8, 9]. С другой стороны, использование сигнала с большой базой может усложнить его прием, а именно процесс синхронизации. Так как для поставленной задачи требуется всего лишь 10 сигналов, то достаточно будет использовать 16-ти позиционный сигнал.

В качестве основы для ШПС могут быть псевдослучайные последовательности или ортогональные сигналы [10]. Псевдослучайные последовательности

инвариантны к сдвигу, таким образом, компенсируются запаздывания прихода лучей. Автокорреляционная функция (АКФ) псевдослучайных сигналов имеет низкий уровень выбросов боковых лепестков, что является хорошо, при использовании данного сигнала в качестве чипа для систем связи, для которых важна точная синхронизация. Автокорреляционная функция позволяет определить полезный сигнал, только когда ПСП приходит целиком.

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-T}^T X(t) \cdot Y(t-\tau) dt. \tag{2}$$

К псевдослучайным последовательностям относятся М-последовательности, коды Голда, коды Касами [11, 12], коды Уилларда [13]. Недостатком ПСП является высокий уровень боковых лепестков взаимной корреляционной функции (ВКФ) (2). На рис. 2, а и б изображены АКФ М-последовательности и псевдослучайной последовательности Голда соответственно, а на рис. 2, в и г изображены их ВКФ.

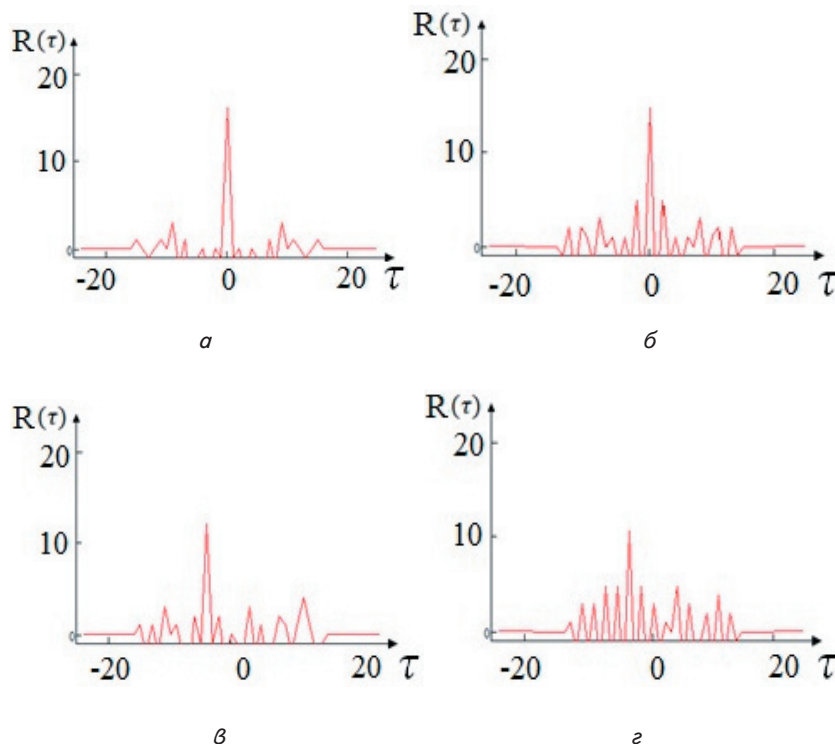


Рис 2. АКФ: а – М-последовательности; б – псевдопоследовательности Голда, ВКФ: в – М-последовательности; г – псевдопоследовательности Голда

Исходя из требований к последовательности, которая должна быть выбрана для защиты от помех класса ВНЗ, каждый сигнал должен быть отличен от другого, а, следовательно, ВКФ должна иметь минимальные всплески амплитуды по боковым лепесткам. Требование к всплескам боковых лепестков ВКФ сигналов согласно [14], при количестве разрядов N:

$$|H(\omega)| = \sqrt{N}. \tag{3}$$

Другим классом последовательностей, которые могут лежать в основе ШПС, являются ортогональ-

ные сигналы. Ортогональные сигналы, по сравнению с псевдослучайными последовательностями, имеют АКФ с достаточно высоким уровнем боковых лепестков, но взаимно корреляционная функция имеет минимальные уровни. Условием для использования ортогональных сигналов, является точная синхронизация системы передачи-приема информации, так как из-за высокого уровня боковых лепестков АКФ, могут возникнуть ошибки синхронизации. Для задач, которые были поставлены, данное свойство является ключевым, так как нужен минимальный коэффициент взаимной корреляции между сигналами. В системе МАРС синхронизация может быть осуществлена на основе вероятного времени прихода отраженного луча от метеорной области. Как и в предыдущем случае, приемник системы метеорной радиолокации в отдельные моменты времени будет настроен на прием определенного вида сигнала, чтобы не принимать сигналы, отраженные от ионосферы. Таким образом, приемник будет настраиваться на сигнал, который должен быть принят через ожидаемое время отражения радиоволны от метеорной области.

5. Моделирование и численный анализ предложенных последовательностей

В качестве ортогонального сигнала может быть взята последовательность Уолша, которая образуется на основе строк матрицы Адамара [10]. В матрице Адамара каждый столбец ортогонален друг другу. Для формирования ортогональной последовательности была взята матрица Адамара 16-го порядка, которая изображена на рис. 3.

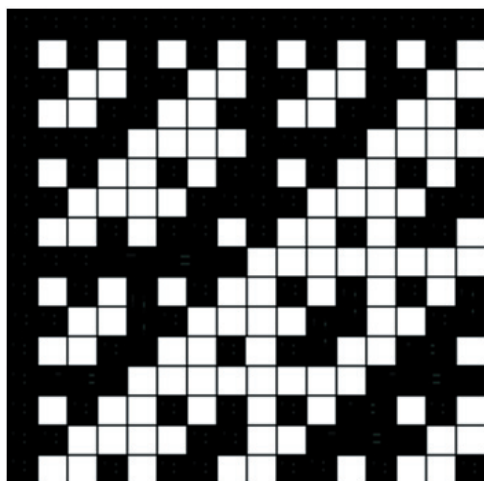


Рис. 3. Матрица Адамара

Так как для осуществления оптимальной защиты от помех ВНЗ, достаточно только 10 сигналов, были

взяты первые 10 строк матрицы Адамара, и был проведен анализ ВКФ ансамбля сигналов. На рис. 4 изображены ВКФ разных сигналов. Стоит заметить, что для 16-ти разрядной последовательности величина всплесков ВКФ меньше, чем требуется согласно (3).

Таким образом, при использовании данного ансамбля из 10 16-ти позиционных сигналов ВКФ будет минимальна, а, следовательно, помехи, возникающие за счет ВНЗ и приходящие в момент времени, в который ожидается приход другого сигнала, также будут минимальны.

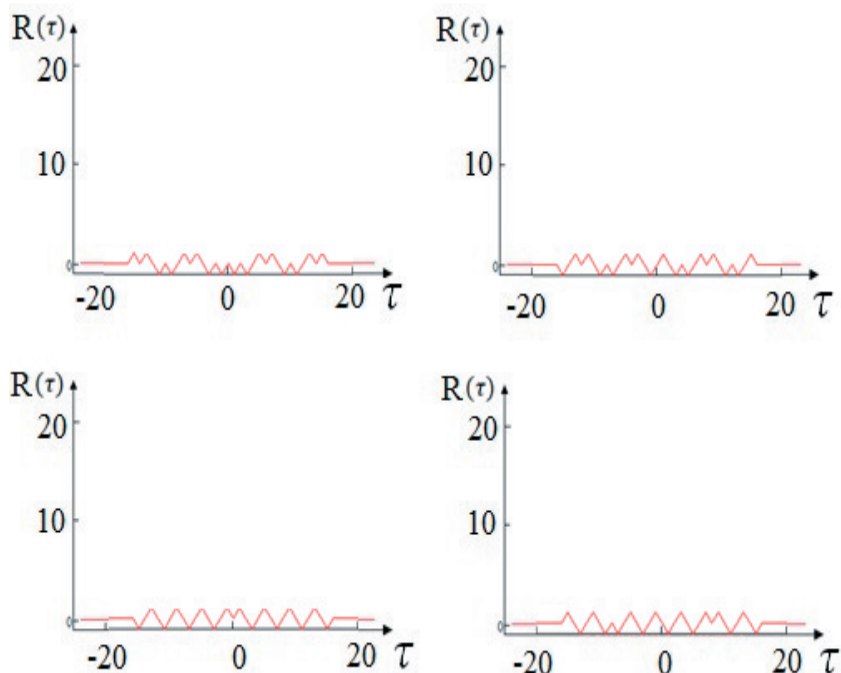


Рис. 4. ВКФ разных сигналов

Использование ШПС в системе метеорной радиолокации может обеспечить не только защищенный от помех прием, но также и улучшить ряд характеристик комплекса МАРС. Сигнал, отраженный от метеорного следа несет в себе ряд полезной информации, с применением ШПС можно улучшить качество принимаемой информации.

Можно расширить полосу частот передаваемого сигнала, тем самым сузить его импульс. Уменьшая длительность импульса до величины, меньшей времени запаздывания лучей, осуществляем прием одного или ряда запаздывающих лучей, при этом суммируя их энергию можно получить высокую помехоустойчивость. Кроме этого, более узкие импульсы, чем у простого сигнала, позволяют точнее определять дальность до метеорного следа, и, как следствие, скорость и радиант.

Также, применение сложных сигналов позволяет более точно определять доплеровское смещение частоты, из которого можно определять ветровое смещение следа. Помехоустойчивость ШПС позволяет легко выделять полезный сигнал на фоне узкополосных помех. И тем самым, сегодня можно проводить метеорные исследования, несмотря на возросший уровень помех.

6. Выводы

В статье были разработаны методы активной защиты МАРС от помех класса ВНЗ, которые являются серьезной помехой для работы имеющихся систем метеорной радиолокации. Разработаны основные требования к методам защиты от помех.

Таким образом, были предъявлены требования к количеству сигналов. Исходя из наклонной дальности до ионосферы (~ 2500 км) и наклонной дальности до метеорной области (~ 200 км), был сделан вывод, что всего требуется взять 10 сигналов. Также было предъявлено требование к различимости одного сигнала на

фоне другого. Было разработано два метода. Первый метод основан на динамически-изменяющихся частотах. Вторым методом основан на использовании ШПС. Также было проведено моделирование сигналов, согласно предъявленным требованиям к сигналам ШПС. Были выбраны 10 сигналов, реализованных на основе разных кодовых последовательностей, ВКФ которых не имеет всплесков выше уровня \sqrt{N} , где N – число разрядов.

Исходя из этого, был выбран 16-ти позиционный сигнал. На основе выполненного в статье моделирования, был выбран ансамбль сигналов, удовлетворяющий поставленным требованиям.

Литература

1. Мак-Кинли, Д. Методы метеорной астрономии [Текст] / Д. Мак-Кинли; пер. с англ. Л. А. Катасева. – М: Мир, 1964. – 383 с.
2. Кашеев, Б. Л. Метеорные явления в атмосфере Земли [Текст] / Б. Л. Кашеев, В. Н. Лебединец, М. Ф. Лагутин. – М.: Наука, 1967. – 260 с.
3. Schilling, D. L. Meteor burst communications: theory and practice [Text] / D. L. Schilling. – Wiley, 1993. – 459 p.
4. Антипов, И. Е. Современные средства и методы радиолокационных метеорных исследований [Текст] / И. Е. Антипов, А. А. Костыря, А.И. Шкарлет // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн.сб. – 2010. – Вып. 169. – С. 55–59.
5. Fukao, S. MU radar - New capabilities and system calibrations [Text] / S. Fukao, T. Sato, T. Tsuda, M. Yamamoto, M. D. Yamanaka. – International Workshop on the Technical and Scientific Aspects of MST Radars, 4th, Kyoto, Japan, Nov. 29-Dec. 2, 1988 Radio Science, vol. 25, 1990,. – P. 477–485.
6. Rottger, J. Ionosphere and atmosphere research with radars [Text] / J. Rottger. – Paris: Geophysics and Geochemistry 6.16.5.3, 2004. – 1353-1356
7. Антипов, И. Е. Об использовании высоких частот в метеорной радиолокации [Текст] / И. Е. Антипов, А. А. Костыря, А.И. Шкарлет // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн.сб. – 2012. – Вып. 169. – С. 55–59.
8. Johanson, F. GPS Satellite Signal Acquisition and Tracking, Division of Signal Processing [Text] / F. Johanson, R. Mollaei, J. Thor, J. Uusitalo. – Luleca University of Technology: Undergraduate Projects, 1998. – 34 p.
9. Tsui, J. B. Y. Fundamentals of Global Positioning System Receiver [Text] / J. B. Y. Tsui. – A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2000. – 255 p.
10. Невдяев, Л. CDMA: сигналы и их свойства [Текст] / Л. Невдяев // Журн. Сети/Network world. – 2000. – №11. – С. 150–157.
11. Диксон, Р. К. Широкополосные системы [Текст]: пер. с англ. – В. И. Журавлева.; М.: Связь, 1979. – 304 с
12. Прокис, Дж. Цифровая связь [Текст]. Пер. с англ./Под ред. – Д. Д. Кловского. М.: Радиоисвязь, 2000. – 800 с.
13. Fakatselis, J. Processing Gain for Direct Sequence Spread Spectrum Communication Systems and PRISMTM [Text]/ J. Fakatselis, J. Madjid, A. Belkerdid. – Application Note 9633, Harris Semiconductor, 1996. – 4 p.
14. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст] / Л. Е. Варакин; – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.