

ПРОБЛЕМИ

ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ ФАХОВЕ ВИДАННЯ ХНУРЕ

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

[http:// pt.journal.kh.ua](http://pt.journal.kh.ua)

● №1 (20) ● 2017 ●



**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ ФАХОВЕ ВИДАННЯ
ЖУРНАЛ «ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»

• №1 (20) • 2017 •

Журнал включено до переліку спеціалізованих видань ВАК України з технічних наук, постанова президії Вищої атестаційної комісії України від 10 березня 2010 року №2-05/2.

Рекомендовано рішенням редколегії е-журналу «Проблеми телекомунікацій» Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ), протокол № 4 від 16 жовтня 2017 року.

Відповідальність за зміст статей покладається на авторів.

Редакційна колегія:

Головний редактор:

Поповський Володимир Володимирович (доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ).

Члени редколегії:

Gomes Teresa (PhD in Electrical engineering, University of Coimbra, Portugal);

Gustavsson Rune (PhD, Professor emeritus, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden);

Jo Minho (PhD, Professor, Korea University, Seoul, Korea);

Segeč Pavel (Doc. Ing., PhD, University of Žilina, Žilina, Slovakia);

Tutschku Kurt (Prof. Dr., Professor, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden);

Yatskiv Irina (Dr.Sc.Ing., Professor, Transport and Telecommunication Institute, Riga, Latvia);

Агєєв Дмитро Володимирович (доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ);

Бєзрук Валерій Михайлович (доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ);

Бєркман Любов Наумівна (доктор технічних наук, професор, Державний університет телекомунікацій);

Васюта Костянтин Станіславович (доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба);

Василишин Володимир Іванович (доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба);

Дуравкін Євген Володимирович (доктор технічних наук, доцент, ХНУРЕ)

Євсєєва Оксана Юрїївна (доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ);

Єременко Олександра Сергїївна (кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ХНУРЕ);

Климаш Михайло Миколайович (доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»);

Коляденко Юлія Юрїївна (доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ);

Лемешко Олександр Віталійович (доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ);

Лошаков Валерій Андрійович (доктор технічних наук, професор, ХНУРЕ);

Олійник Володимир Филімонович (доктор технічних наук, професор);

Серков Олександр Анатолійович (доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»);

Стрєлковська Ірина Вікторівна (доктор технічних наук, професор, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова);

Титаренко Лариса Олександрівна (доктор технічних наук, професор, Університет зеленогурський).

Відповідальний за випуск:

доктор технічних наук, професор *Лемешко О.В.*

Адреса редакційної колегії: Харківський національний університет радіоелектроніки,
головний корпус, ауд. 305а,
проспект Науки, 14, Харків, 61166,
тел. (57) 702-13-20, e-mail: pt-info@journal.kh.ua

Передрукування та використання матеріалів,
опублікованих в журналі, можливо тільки з дозволу редколегії

© Харківський національний
університет радіоелектроніки, 2017

ЗМІСТ

УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

КОЛЯДЕНКО Ю.Ю., ЛУКИНОВ И.Г. Метод повышения скрытности сигналов управления в программно-конфигурируемой сети

БЕЗРУК В.М., СКОРИК Ю.В., ГАЛЬЧЕНКО К.Р. Многокритериальный выбор предпочтительного протокола маршрутизации в ad-hoc сетях методом анализа иерархий

MOHANAD NAJM ABDULWAHD, ALI SALEM ALI. Flow-based balancing solution of traffic policing

БЕЗПРОВОДОВІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

АВДЄЄНКО Г.Л., БУНІН С.Г., НАРИТНИК Т.М., ЄРМАКОВ А.В., ВОЛКОВ В.В.
Обґрунтування частотних діапазонів для високошвидкісних безпроводових телекомунікаційних систем терагерцового діапазону

АВДЄЄНКО Г.Л., ІЛЬЧЕНКО М.Ю., НАРИТНИК Т.М., ЄРМАКОВ А.В., ЛУТЧАК О.В.
Перетворювач частоти для прийомопередавача безпроводової телекомунікаційної системи фіксованого зв'язку терагерцового діапазону

НАРИТНИК Т.М., ЄРМАКОВ А.В., БОНДАРЧУК С.О., ВАЛЬЧУК Д.С. Аналіз терагерцових технологій та їх застосування для створення інноваційних розробок

ІЛЬЧЕНКО М.Е., ДЕНБНОВЕЦКИЙ С.В., НАРЫТНИК Т.Н., ЛУТЧАК А.В., МАЙ А.В.
Проектирование интегрального приемника терагерцового диапазона частот

ПОВІДОМЛЕННЯ

Інформаційне повідомлення щодо проведення 14-ї IEEE Міжнародної конференції «Перспективні тенденції в радіоелектроніці, телекомунікаціях та комп'ютерній інженерії» (IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering).

УДК 621.396.677.49

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОГРАММНО- КОНФИГУРИРУЕМОЙ СЕТИ



[Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО](#), [И.Г. ЛУКИНОВ](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – Possible attacks specific to SDN-networks are data corruption, disclosure of information about the network state, denial of service, compromise the switch, interception of traffic, and attack on the control channel. The main attacks on the control channel are considered, which are possible when the switch is compromised. In SDN networks, when communicating sensitive information between the controller and the switch, the problem is to counteract unauthorized access (CUA) or attacks. Unauthorized access to transmitted information involves detecting a signal, determining the structure of a detected signal, and disclosing the information contained in the signal. The listed tasks of the CUA are opposed to three types of stealth signals: energy, structural and information. A method for increasing the stealth of control signals in the SDN network is developed through the use of timed signal structures (TSS). With the help of mathematical modeling, the probability of disclosing the structure of a TSS is determined. As studies showed, the probability of disclosure of the signal structure significantly decreases with the growth of the TSS formation interval. The probability of information concealment of TSS is analyzed depending on the number of analyzed TSS at various parameters. As studies have shown, an increase in the ensemble of realizations and an increase in the number of jointly analyzed constructions reduces the probability of disclosing the semantic content of the transmitted information.

Анотація – Розроблено метод підвищення скритності сигналів управління в мережі SDN за рахунок застосування таймерних сигнальних конструкцій (ТСК). За допомогою математичного моделювання визначено ймовірності розкриття структури ТСК. Проведено аналіз ймовірностей інформаційної скритності ТСК в залежності від кількості аналізованих ТСК при різних його параметрах.

Аннотация – Разработан метод повышения скрытности сигналов управления в сети SDN за счет применения таймерных сигнальных конструкций (ТСК). С помощью математического моделирования определены вероятности раскрытия структуры ТСК. Проведен анализ вероятностей информационной скрытности ТСК в зависимости от количества анализируемых ТСК при различных его параметрах.

Введение

Сеть связи характеризуется огромной стоимостью и большими сроками строительства. Изменения в стандартах связи происходят регулярно, но переход к новому стандарту требует новых вложений и замены оборудования, которое часто еще не выработало свой ресурс. Сейчас для запуска сети нового поколения все становится проще благодаря технологии программно-конфигурируемых сетей (SDN). В подобного рода сетях ряд основных функций, связанных с управлением процессами коммутации и маршрутизации, централизованы и вынесены на специальный сетевой контроллер [1, 2].

Взаимодействие между сетевым контроллером и передающими устройствами реализуется посредством программного интерфейса, который используется для прямого управления группами устройств. Наиболее развитым программным интерфейсом на данный момент является протокол OpenFlow [1, 3-7]. Архитектура OpenFlow-коммутатора базируется на одной или нескольких таблицах правил, определяющих механизм обработки потоков сетевого трафика. Каждое правило является записью в

таблице OpenFlow-коммутатора. Запись сопоставляется с определенным потоком трафика. В зависимости от результата сопоставления применяется соответствующее действие (блокирование, передача, модификация и т.д.) к пакетам из данного потока.

Архитектура SDN, предполагая существенно иной подход к реализации сетевой инфраструктуры, не лишена потенциальных уязвимостей с точки зрения информационной безопасности. Необходимость разделения доступа сетевых приложений при работе с контроллером, вопросы аутентификации и авторизации при работе приложений с контроллером – это лишь немногие аспекты безопасности, которые приходится принимать во внимание при проектировании SDN-сетей [1].

Основными компонентами программно-конфигурируемых сетей на базе протокола OpenFlow являются:

- 1) коммутатор OpenFlow
- 2) контроллер OpenFlow
- 3) канал связи, с помощью которого осуществляется взаимодействие контроллера и коммутатора, как правило, для защиты передаваемых сообщений используется TLS, но возможна передача по стандартному TCP без шифрования [4].

Сообщения по каналу связи передаются посредством сигналов, которые атакующий может перехватить и атаковать канал управления, что может повлечь критичные для всей инфраструктуры последствия. Таким образом, разработка метода повышения скрытности сигналов управления в программно-конфигурируемой сети является актуальной научной задачей.

I. Основные атаки и угрозы сети SDN

Возможными атаками, специфичными для SDN-сетей являются [1]:

- искажение данных;
- раскрытие информации о состоянии и статусе сети;
- отказ в обслуживании;
- компрометация коммутатора;
- перехват трафика;
- атака на канал управления.

Рассмотрим основные атаки на канал управления, которые возможны при компрометации коммутатора.

Перехват управляющего трафика.

Атакующий может использовать скомпрометированный коммутатор для перехвата управляющего трафика, через данный коммутатор. Более того, атакующий может перехватить управляющий трафик, посылаемый скомпрометированному коммутатору, если перед этим был произведен перехват управляющего канала. Скомпрометированный коммутатор может быть использован для атак на целостность сети. Атакующий может производить подделку видимого для контроллера состояния коммутатора и создавать поддельные виртуальные коммутаторы в данной сети.

Подделка состояния коммутатора.

Скомпрометированный коммутатор используется атакующим для того, чтобы передавать контроллеру ложные сведения о текущем состоянии данного коммутатора или других коммутаторов, подключенных к контроллеру, через скомпрометированный коммутатор. Например, атакующий может передавать контроллеру ложную информацию о содержимом таблиц потоков, о статистике по трафику или о том, какие интерфейсы имеет коммутатор. Атакующий может подделывать состояния других коммутаторов. Данная атака может быть использована для изменения сетевой топологии. Атакующий может влиять на процесс выбора маршрута для потоков в сети.

Компрометации контроллера.

Приложения, работающие на контроллере, могут содержать в себе уязвимости, эксплуатация которых приведет к компрометации контроллера атакующим. Также приложения могут уже содержать вредоносный код. Большинство современных контроллеров не предоставляют разграничение доступа для приложений на контроллере, что приводит к тому, что каждое приложение может иметь доступ не только к внутренним данным других приложений, но и к внутренним структурам контроллера. Типичной атакой, базирующейся на данных свойствах контроллеров, может быть то, что вредоносное приложение может изменить структуру, содержащую внутреннее представление сети, что приведет к неправильной работе всех приложений на контроллере.

II. Метод повышения скрытности сигналов управления в SDN-сети за счет применения таймерных сигнальных конструкций

В сетях SDN при передаче конфиденциальной информации между контроллером и коммутатором проблемой является обеспечение противодействия средствам несанкционированного доступа (НСД) или атакам [8, 9]. Несанкционированный доступ к передаваемой информации предполагает обнаружение сигнала, определение структуры обнаруженного сигнала и раскрытие содержащейся в сигнале информации. Перечисленным задачам НСД противопоставляются три вида скрытности сигналов: энергетическая, структурная и информационная.

Энергетическая скрытность характеризует способность противостоять мерам, направленным на обнаружение сигнала средствами НСД. Известно [9], что одним из путей повышения энергетической скрытности является увеличение ширины спектра используемых сигналов, что достигается применением шумоподобных (ШПС) и хаотических сигналов в системах конфиденциальной передачи информации.

Структурная скрытность характеризует способность противостоять мерам НСД, направленным на раскрытие структуры сигнала при условии, что сигнал уже обнаружен. Это означает распознавание формы сигнала и измерение его параметров, т.е. отождествление обнаруженного сигнала с одним из множества априорно известных передаваемых символов. Очевидно, что для увеличения структурной скрытности

необходимо иметь по возможности большой ансамбль используемых сигналов с изменяемыми во времени параметрами. Информационная скрытность определяется способностью системы противостоять мерам, направленным на раскрытие смыслового содержания сообщения, передаваемого с помощью сигналов [8]. Раскрытие смыслового содержания означает отождествление каждого принятого сигнала или их множества с тем сообщением, которое передавалось.

Противодействие средствам НСД является важнейшей задачей, поэтому следует осуществлять поиск и исследование методов передачи, позволяющих увеличить скрытность сигналов управления в сетях SDN. В данной работе рассматривается возможность повышения скрытности сигналов бинарного канала за счет применения таймерных сигнальных конструкций (ТСК) [10].

Известно, что индивидуальные двоичные каналы имеют базу $B = 1$ и используют избыточный код. Эффективность [9] использования двоичного канала можно повысить за счет таймерного метода формирования сигнальных конструкций на заданном интервале n – элементного избыточного кода. Сигнальный алфавит бинарных таймерных сигнальных конструкций для каждого индивидуального канала формируется на интервале времени $T_c = nt_0$ (t_0 – величина, обратная полосе пропускания канала ΔF) при базовом элементе Δ ($\Delta = \frac{t_0}{S}$, $S = 1, 2, \dots, k$ – целые числа).

Пример формирования сигнального алфавита бинарных ТСК на интервале времени $T_c = 7t_0$ при базовом элементе Δ показан на рис. 1.

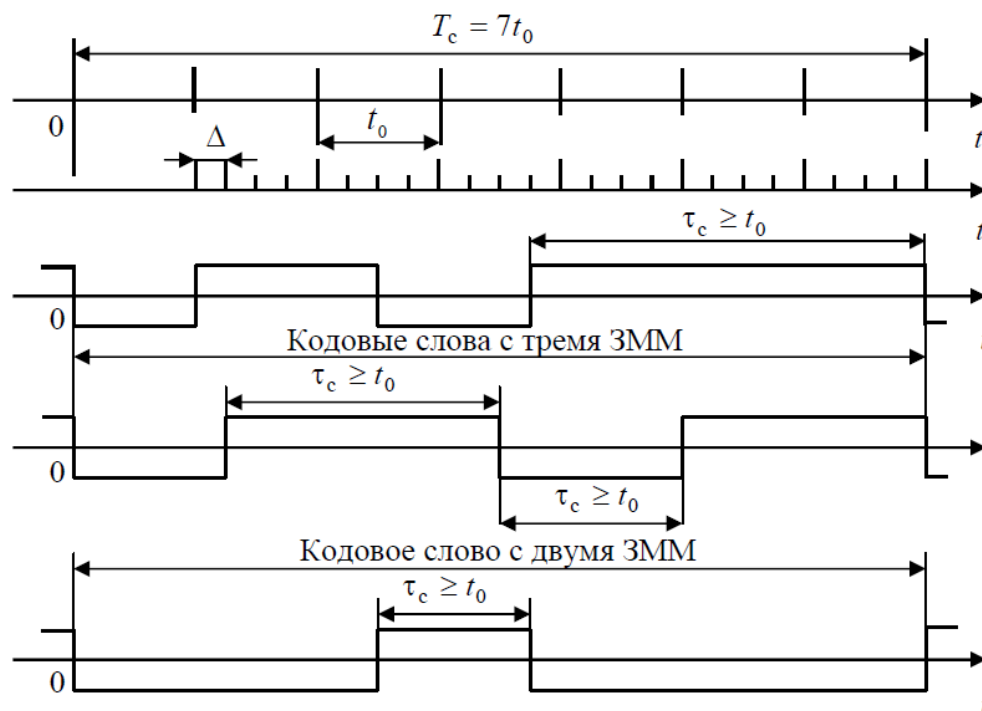


Рис. 1. Формирование сигнального алфавита бинарных ТСК на интервале времени $T_c = 7t_0$ при базовом элементе Δ

Каждый значащий момент модуляции (ЗММ) может занимать на интервале формирования ТСК позиции, расположенные на расстоянии $k\Delta \geq t_0$ друг от друга по отношению к предыдущему, причем Δ определяется как минимальное расстояние между соседними положениями одного ЗММ в разных конструкциях. Информация о передаваемом сообщении, переносимая ТСК, содержится в номере временной позиции, занимаемой ЗММ.

Из рисунка видно, что в каждой сигнальной конструкции сигнал с длительностями Δ в канал не передается. Однако длительность элемента Δ учитывается, когда на приеме производится оценка поступившей конструкции в сравнении со всеми возможными реализациям.

III. Метод повышения скрытности сигналов управления в сети SDN за счет применения таймерных сигнальных конструкций

Определению информационной скрытности предшествует оценка структурной скрытности сигналов. Рассмотрим возможность увеличения ансамбля передаваемых сигналов при использовании ТСК. Известно [10], что множество реализаций бинарных ТСК формируется на интервале времени $T_c = nt_0$, где n – количество элементарных посылок, а t_0 – их длительность.

Базовым элементом при формировании является ТСК $\Delta = \frac{t_0}{S}$. В отличие от рядно-цифрового кода (РЦК), когда информация о передаваемом разряде определяется уровнем сигнала элементарной посылки, в ТСК информация заложена в нескольких отдельных (временных) интервалах сигнала $\tau_c = t_0 + k\Delta$, где $k = 0, 1, 2, \dots, S(n-2)$ и их на интервале T_c взаимном положении. С одной стороны такой метод формирования дает возможность передавать в канал отрезки сигнала длительностью $\tau_c \geq \Delta \cdot (S+i)$, где $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ (i – число информационных ЗММ в сигнале), что исключает межсимвольные искажения в каналах с базой $B = 1$. С другой стороны не кратность τ_c величине t_0 позволяет уменьшить расстояния между сигнальными конструкциями до величины $\Delta < t_0$ и получить число реализаций ТСК $N_{ТСКp}$ на интервале nt_0 значительно больше $2n$ [10]:

$$N_{ТСКp} = \sum_{i=1}^n \frac{[(n \cdot S) - [(S-1)i]]!}{i! [(n \cdot S) - [(S-1)i] - i]!} \quad (1)$$

Число реализаций ТСК с учетом значений S , n и $i = 1, \dots, n$ приведено в табл. 1. Анализ таблицы показывает, что кодек ТСК позволяет сформировать значительно больше разрешенных ТСК на одном и том же интервале, чем кодовых слов РЦК, где число реализаций $N = 2^n$. Например, при формировании ТСК на интервале $T_c = 5t_0$ и $S = 7$ число возможных реализаций $N_{ТСКp} = 1293$. Такое количество реализаций можно получить только с помощью простого двоичного кодового слова с длиной $n = \log_2 1293 = 11$ элементов.

Таблица 1. Количество реализаций ТСК при различных значениях S и n

$n \backslash S$	1	2	3	4	7	10	15	20
5	31	88	188	344	1293	3310	10475	24940
8	255	1596	5895	16492	153400	735450	4952841	20628612
10	1023	10945	58424	217224	3705000	27042520	302000000	1830000000

На рис. 2 показана упрощенная структурная схема системы передачи конфиденциальной информации с использованием ТСК. Источник информации выдает непрерывную последовательность информационных двоичных элементов РЦК, которая кодером ТСК разбивается на блоки некоторой длины РЦК k .

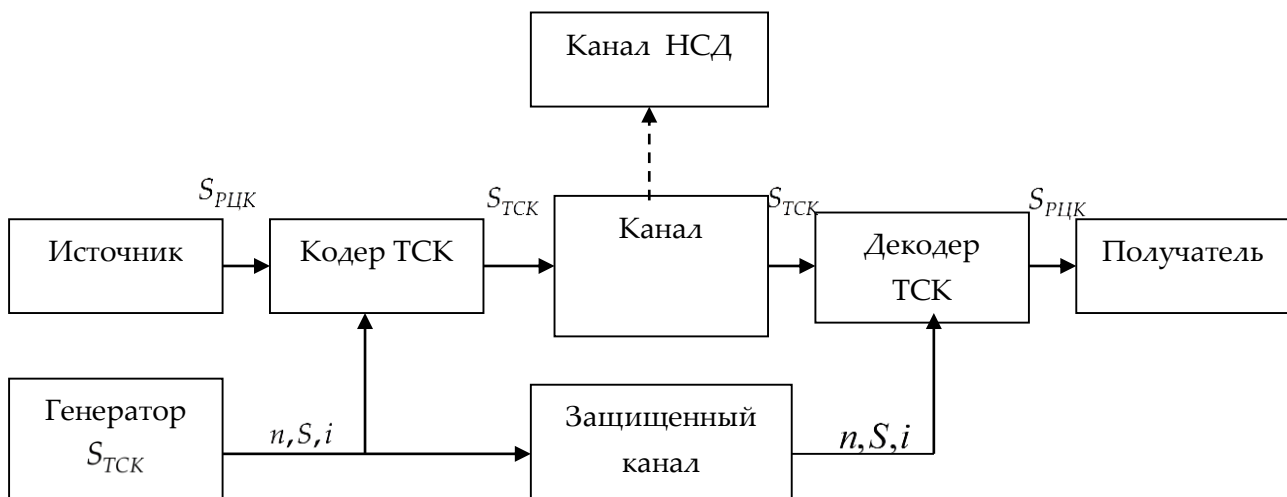


Рис. 2. Структурная схема системы передачи конфиденциальной информации

Длина блока РЦК k определяется из условия максимально возможного числа реализаций $N_{ТСКp}$, сформированных на некотором интервале n при выбранных параметрах S и i , тогда:

$$k_{РЦК} \leq \log_2 N_{ТСКp} \quad (2)$$

Каждой длине блока РЦК k соответствует число, определяющее номер реализации РЦК. Кодер ТСК осуществляет кодирование сигнала РЦК $S_{РЦКj}$ в сигнал ТСК $S_{ТСКz}$ по правилу:

$$S_{РЦКj} \rightarrow S_{ТСКz} \quad (n, S, i), \quad (3)$$

т.е. каждый сигнал $S_{РЦКj}$ представляется определенной конструкцией $S_{ТСКz}$, где j и z – соответственно номера реализаций.

Изменение параметров n, S, i дает возможность на выходе кодера ТСК получать различные множества сигнальных конструкций, каждое из которых может отличаться длительностями, зависящими от значений n , числом базовых элементов S и числом переходов i , т. е. структурой сигнала. Например, при определенных значениях n и S можно формировать различные множества конструкций $S_{ТСКz}$ изменением только числа переходов i , где каждому его значению будет соответствовать множество со своей структурой сигнала. Аналогично, изменением S и n или различных допустимых комбинаций n, S, i можно на выходе кодера ТСК получать множества $S_{ТСКz}$ с разной формой сигнала. Частота смены параметров кодером ТСК выбирается такой, чтобы объем перехваченных станцией НСД реализаций ТСК определенной формы с заданными параметрами был не достаточен для раскрытия структуры сигнала в пределах интервалов времени, представляющих практический интерес. Так как параметры n, S, i должны быть известны приемной стороне, то их передача обычно осуществляется по отдельному достаточно защищенному каналу.

Наличие априорной и апостериорной неопределенностей делает задачу определения структуры сигнала вероятностной, поэтому количественной мерой структурной скрытности таймерной сигнальной конструкции может служить вероятность раскрытия структуры сигнала $p_{стр}$ при условии, что сигнал уже обнаружен. Следовательно, $p_{стр}$ представляет собой условную вероятность, и ее определение заключается в нахождении параметров n, S, i .

Для получения максимально возможной структурной скрытности, т. е. достижения минимальной $p_{стр}$, последовательность символов сообщения в кодере должна подлежать такому преобразованию, при котором различные символы в его выходной последовательности появлялись бы по возможности равновероятно. Следовательно, при передаче, например, текста, использующего алфавит из 32 букв, каждая из которых появляется с разной вероятностью, необходимо кодировать не отдельные буквы, а последовательности из различных (учитывающих и порядок) сочетаний букв, чем можно обеспечить достаточно равновероятное появление сигналов на выходе кодера. Но увеличение алфавита приводит к возрастанию ансамбля реализаций, что требует дополнительных затрат, например, увеличения длительности передачи или расширения ширины спектра канала связи, что не всегда желательно. Например, при кодировании последовательностей из двух букв первичный ансамбль реализаций $N = 32$ увеличивается и принимает значение $N = 32^2 = 1024$, что приводит к необходимости использования для передачи такого ансамбля 10-элементного РЦК вместо 5-элементного.

Применение кодера ТСК дает возможность на интервале 5-элементного РЦК при параметрах $n=5, S=7$ и $i = 1...n$ (табл. 1) сформировать достаточный ансамбль реализаций:

$$N_{ТСКp} = 1293 > N_p = 1024,$$

чтобы оставить длительность передачи без изменений.

Значение $p_{стр}$ определяется с учетом минимального ансамбля реализаций $A_{ТСК}$, который требуется проанализировать методом полного перебора для нахождения ключей n , S и i при несанкционированном доступе:

$$p_{стр} = \frac{1}{A_{ТСК}}, \quad (4)$$

где

$$A_{ТСК} = \sum_n \sum_S \sum_{i=1}^n \frac{[(n \cdot S) - [(S-1)i]]!}{i! [(n \cdot S) - [(S-1)i] - i]!}. \quad (5)$$

С помощью математического моделирования определены вероятности раскрытия структуры ТСК в зависимости от значений n, S и i . На рис. 3 приведены графики вероятностей раскрытия структуры ТСК в зависимости от значений n при $S=1$ (верхняя кривая), $S=6$ (средняя кривая) и $S=12$ и $i=1 \dots n$. Как видно из рисунка, вероятности раскрытия структуры сигнала $p_{стр}$ существенно уменьшаются с ростом интервала T_c формирования ТСК.

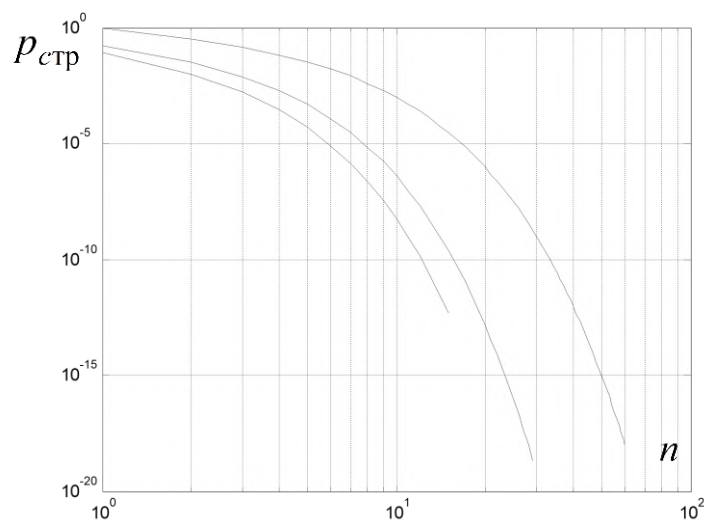


Рис. 3. График вероятностей раскрытия структуры ТСК в зависимости от значений n при $S=1, S=6, S=12$ и $i=1 \dots n$

Раскрыв структуру сигнала, станция НСД располагает набором параметров n, S и i для определения его информационной скрытности.

Предположим, что система передачи использует простой двоичный код, тогда смысловое содержание может быть раскрыто путем анализа соответствий реализаций ТСК реализациям РЦК. Количество сравнений для одной реализации с учетом известных n , S и i определяется выражением:

$$N_{РЦК} = N_{ТСК} = \frac{[(n \cdot S) - [(S - 1)i]]!}{i! [(n \cdot S) - [(S - 1)i] - i]!}, \quad (6)$$

где $N_{ТСК}$ и $N_{РЦК}$ – соответственно число реализаций ТСК и РЦК.

Однако для определения смыслового содержания информации необходимо анализировать не одну ТСК, а совместно некоторое их количество в $N_{ТСК}$. В этом случае необходимое число сравнений $A_{инф}$ будет определяться выражением:

$$A_{инф} = C_{N_{ТСК}}^{N_{aТСК}}. \quad (7)$$

Задача определения информационной скрытности сигнала также является статистической, поэтому в качестве количественной меры информационной скрытности можно принять условную вероятность раскрытия смыслового содержания передаваемой информации $p_{инф}$, заложенной в обнаруженном сигнале с раскрытой структурой. Учитывая, что таймерные конструкции на выходе кодера ТСК равновероятны, а их таблицы перекодировки в РЦК меняются по определенному (известному на приемной стороне) алгоритму, значение определяется формулой:

$$p_{инф} = \frac{1}{A_{инф}}. \quad (8)$$

Например, на приемной стороне для каждого числа переходов i в принятой реализации ТСК при определенных значениях n и S используется своя таблица перекодировки в РЦК. Также разным S или некоторым комбинациям параметров n , S и i могут соответствовать другие таблицы, что повышает информационную скрытность передаваемых сигналов. Частота смены параметров n , S , i и соответствующих им таблиц перекодировки выбирается такой, чтобы накопленные станцией НСД статистические данные по числу перехваченных реализаций ТСК не давали возможности достаточно быстро распознать смысловое содержание передаваемого сообщения.

На рис. 4 приведены графики вероятностей информационной скрытности ТСК в зависимости от количества анализируемых ТСК при различных значениях n , S и i . Как видно из рисунка, увеличение ансамбля реализаций $N_{ТСК}$ и рост числа совместно анализируемых конструкций $N_{aТСК}$ уменьшает вероятность $p_{инф}$.

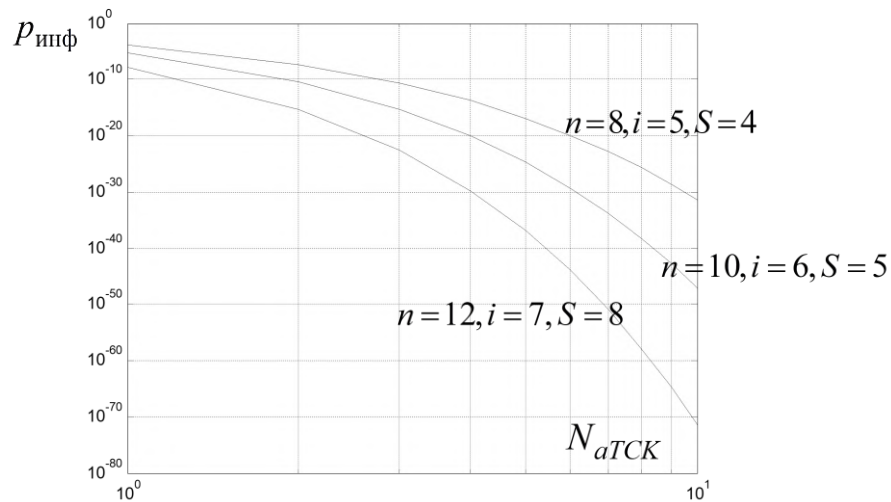


Рис. 4. Графики вероятностей информационной скрытности TCK в зависимости от N_{aTCK} при различных значениях n , S и i

Выводы

1. Возможными атаками, специфичными для SDN-сетей являются: искажение данных; раскрытие информации о состоянии и статусе сети; отказ в обслуживании; компрометация коммутатора; перехват трафика; атака на канал управления. Рассмотрены основные атаки на канал управления, которые возможны при компрометации коммутатора.

2. В сетях SDN при передаче конфиденциальной информации между контроллером и коммутатором проблемой является обеспечение противодействия средствам несанкционированного доступа или атакам. Несанкционированный доступ к передаваемой информации предполагает обнаружение сигнала, определение структуры обнаруженного сигнала и раскрытие содержащейся в сигнале информации. Перечисленным задачам НСД противопоставляются три вида скрытности сигналов: энергетическая, структурная и информационная. Разработан метод повышения скрытности сигналов управления в сети SDN за счет применения таймерных сигнальных конструкций.

3. С помощью математического моделирования определены вероятности раскрытия структуры TCK. Как показали исследования вероятности раскрытия структуры сигнала $p_{\text{стр}}$ существенно уменьшаются с ростом интервала T_c формирования TCK. Проведен анализ вероятностей информационной скрытности TCK в зависимости от количества анализируемых TCK при различных его параметрах. Как показали

исследования, увеличение ансамбля реализаций и рост числа совместно анализируемых конструкций уменьшает вероятность раскрытия смыслового содержания передаваемой информации.

Список литературы:

1. Захаров А. А., Попов Е.Ф., Фучко М. М. Аспекты информационной безопасности архитектуры SDN // Вестник СибГУТИ. – 2016. № 1. – С. 83 – 92.
2. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. Openflow: enabling innovation in campus networks // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2008. – 38 (2). – P. 69–74.
3. OpenFlow Switch Specification Ver 1.5.1, 2016 [accessed January 11, 2016]. <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdnresources/onf-specifications/openflow/openflow-switch-v1.5.1.pdf>.
4. Партыка Т.Л., Попов И.И. Информационная безопасность / Учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2002. – 368с.
5. OpenFlow Switch Specification, Version 1.1.0 Implemented. – Режим доступа: www.openflow.org/documents/openflow-spec-v1.1.0.pdf
6. OpenFlow white paper. – Режим доступа: www.archive.openflow.org/documents/openflow-wp-latest.pdf.
7. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks // SIGCOMM Comput. Commun. – Rev. March. – 2008. – Vol. 38. – P. 69–74.
8. Куприянов А.И., Сахаров А. В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.
9. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / под ред. В. И. Борисова. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.
10. Захарченко Н. В., Крысько А. С., Захарченко В. Н. Основы кодирования: учебное пособие. – Одесса: УТАС им. А. С. Попова, 1999. – 240 с.

УДК 338.984

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ В AD-НОС СЕТЯХ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ



[В.М. БЕЗРУК](#), [Ю.В. СКОРИК](#), [К.Р. ГАЛЬЧЕНКО](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – In the construction of wireless ad-hoc networks, the choice of the preferred routing protocol plays an important role, taking into account a set of quality indicators, which, as a rule, are interrelated and antagonistic. This determines the need to select the preferred routing protocol using multi-criteria optimization methods. In this article, practical features of applying one of such methods, the hierarchy analysis method, are considered for multi-criteria selection of the preferred version of the routing protocol in ad-hoc networks, taking into account a set of quality indicators. The analysis of the most frequently used ad-hoc networks of proactive protocols DSDV, OLSR, WRP, as well as AODV, DSR reactive protocols was carried out. As quality indicators, the main characteristics of the protocols are chosen, in particular, the convergence time, memory, and control. According to the method of analyzing hierarchies with the involvement of experts, matrices of paired comparisons of quality indicators and considered routing protocols were obtained. For the matrices obtained, their principal eigenvectors and priority vectors are calculated, which are then used to calculate the global priority vector. The preferred value of the global priority vector component is the preferred version of the routing protocol in the wireless ad-hoc network. This protocol is an OLSR routing protocol based on the Dijkstra algorithm.

Анотація – Проаналізовано характеристики різних протоколів маршрутизації в безпроводових ad-hoc мережах з урахуванням сукупності показників якості. Розглянуто математичні особливості одного з методів багатокритеріального вибору переважного варіанту - методу аналізу ієрархій. На основі проаналізованих даних отримано вектор глобальних пріоритетів, за максимальним значенням компонент якого обраний кращий варіант маршрутизації в безпроводовій ad-hoc мережі.

Аннотация – Проанализированы характеристики различных протоколов маршрутизации в беспроводных ad-hoc сетях с учетом совокупности показателей качества. Рассмотрены математические особенности одного из методов многокритеріального выбора предпочтительного варианта – метода анализа иерархий. На основе проанализированных данных получено вектор глобальных приоритетов, по максимальному значению компонент которого выбран лучший вариант маршрутизации в беспроводной ad-hoc сети.

Введение

Беспроводные ad-hoc сети относятся к мобильным децентрализованным динамическим самоорганизующимся сетям, которые не имеют постоянной структуры [1]. Каждое устройство, принимающее участие в организации такой сети, может являться передатчиком, приемником, ретранслятором и конечным устройством. Каждый узел ad-hoc сети может свободно перемещаться в любое время и в любом направлении, причем вследствие этого некоторые старые связи могут быть утеряны, а также могут быть установлены новые связи уже с другими узлами сети. Такая технология построения беспроводной сети показывает себя актуальной в ситуациях, когда необходимо быстро развернуть сеть на территории с подвижными узлами. Примерами таких ситуаций могут служить стихийные бедствия, военные действия и другие экстренные ситуации. За счет постоянного изменения структуры сети могут возникнуть проблемы с маршрутизацией, так как изменяются возможные пути доставки ин-

формации между узлами. Эти проблемы решаются с помощью проактивных, реактивных и гибридных протоколов маршрутизации [1-5]. Следует отметить, что каждый протокол маршрутизации характеризуется совокупностью показателей качества, определяющих основные свойства выбранного способа маршрутизации. Показатели качества протоколов маршрутизации, как правило, связаны между собой и являются антагонистическими, когда при улучшении одного показателя качества ухудшаются другие показатели качества. При построении ad-hoc сетей возникает необходимость выбора предпочтительного протокола маршрутизации с учетом совокупности противоречивых показателей качества. В этих случаях для сравнительного анализа и выбора предпочтительного протокола маршрутизации следует применять методы многокритериальной оптимизации [6]. В данной статье рассматриваются особенности применения метода анализа иерархий для многокритериального выбора единственного предпочтительного варианта маршрутизации в ad-hoc сетях с учетом совокупности показателей качества.

I. Сравнительный анализ протоколов маршрутизации в ad-hoc сетях

В ad-hoc сетях наиболее часто применяются проактивные протоколы DSDV, OLSR, WRP, а также реактивные протоколы AODV, DSR. Кратко рассмотрим некоторые особенности этих протоколов [1-5].

DSDV (Dynamic Source Routing protocol) – протокол, основанный на алгоритме Беллмана-Форда, пересылающий обновления сразу после их получения. Каждое обновление маршрутов каждого узла имеет свой уникальный порядковый номер, что позволяет обеспечить актуальность информации о маршрутах. Предусматривает возможность подключения одного из узлов ad-hoc сети к любой другой сети, в таком случае этот узел является шлюзом.

OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) – протокол, основанный на алгоритме Дейкстры. В нем введена концепция сетевых устройств, которые играют роль MPR (Multi Point Relay) и, по сути, являются основой ad-hoc сети. Именно устройства MPR могут формировать и рассылать обновления через всю ad-hoc сеть. Каждое устройство, не выполняющее роль MPR, выбирает один или несколько таких MPR устройств, от которых получает обновления маршрутной информации, но не транслирует ее в сеть.

WRP (Wireless Routing Protocol) – протокол, в котором периодический обмен таблицами маршрутизации и защита от возникновения петель маршрутизации осуществляется аналогично протоколу RIP, создавая соединения, которые постоянно поддерживаются между соседними ad-hoc узлами сети.

AODV (Adhoc On-Demand Distance Vector) – протокол, использующий вектор расстояния по запросу. Он позволяет клиенту при необходимости установить соединение с другим клиентом с помощью распространения запроса по всей ad-hoc сети. Все узлы, получившие запрос, сохраняют информацию об отправителе в таблице маршрутизации, а ответ на запрос возвращается по установленному маршруту.

DSR (Dynamic Source Routing protocol) – протокол, который функционально похож на AODV, однако не использует маршрутизацию от источника. В нем путь прохождения пакета по всем узлам указывается внутри пакета, и ответный пакет возвращается по тому же маршруту, по какому пришел запрос.

Следует отметить, что каждый протокол маршрутизации характеризуется совокупностью показателей качества. В качестве показателей качества могут служить такие характеристики протоколов как время конвергенции, память, управление. Эти показатели качества связаны между собой и являются антагонистическими. Поэтому для выбора предпочтительного протокола маршрутизации в ad-hoc сетях следует применять методы многокритериальной оптимизации. Одним из таких методов является метод анализа иерархий.

II. Математические особенности метода анализа иерархий

Кратко рассмотрим некоторые особенности метода анализа иерархий (МАИ) [6]. Суть этого метода состоит в декомпозиции проблемы выбора единственного предпочтительного варианта проектируемой системы из некоторого множества вариантов с учетом совокупности показателей качества. Принцип декомпозиции предусматривает структурирование проблемы выбора в виде иерархии уровней с вершины (цель выбора) через промежуточный уровень 2 (показатели качества системы) к самому низкому уровню 3 (альтернативные варианты построения системы). Затем от опытных экспертов получают их субъективные суждения в виде парных сравнений относительной важности различных элементов проблемы выбора. В результате обработки полученных численных данных составляются матрицы парных сравнений элементов проблемы выбора. Для этих матриц вычисляются их главные собственные векторы, соответствующие максимальным собственным значениям. Далее согласно определенным математическим процедурам получают вектор глобальных приоритетов, компоненты которого определяют приоритетность выбора предпочтительного варианта проектируемой системы. Единственному предпочтительному варианту системы из заданного множества вариантов соответствует максимальное значение компонент вектора глобальных приоритетов.

Принцип сравнительных суждений экспертов в МАИ заключается в том, что элементы проблемы выбора сравниваются экспертами попарно по важности. Попарно сравниваются относительная важность разных вариантов систем (на уровне 3) и разных показателей качества системы (на уровне 2). Результаты парных сравнений сводятся к матричной форме

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & & & \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ – оценки парных сравнений разных элементов выбора w_i, w_j .

Диагональ этой матрицы заполняется значениями "1", а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполняются соответствующими обратными значениями.

Оценки парных сравнений элементов a_{ij} находятся с использованием субъективных суждений экспертов, численно определяемых по шкале относительной важности элементов, которая представлена в табл. 1.

Таблица 1. Шкала относительной важности элементов сравнения

Относительная важность	Определение
1	Равная важность элементов сравнения
3	Умеренное превосходство одного элемента над другим
5	Существенное превосходство одного элемента над другим
7	Значительное превосходство одного элемента над другим
9	Очень сильное превосходство одного элемента над другим
2,4,6,8	Промежуточные решения между двумя суждениями

Далее выполняется обработка сформированных матриц парных сравнений, которая с математической точки зрения сводится к вычислению главного собственного вектора, соответствующего максимальному собственному значению матрицы. Компоненты главного собственного вектора матрицы парных сравнений показателей качества вычисляются как среднее геометрическое значение в строке матрицы парных сравнений

$$V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где n – число показателей качества.

Через компоненты главного собственного вектора вычисляются соответствующие компоненты вектора приоритетов в виде нормированных значений

$$P_j = \frac{V_j}{S}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $S = \sum_{j=1}^n V_j$.

Такие процедуры выполняются вначале на уровне 2 для показателей качества системы. Аналогично находятся оценки матриц парных сравнений вариантов систем на уровне 3 в отдельности по отношению к каждому показателю качества системы. На основе этих матриц согласно (2) и (3) вычисляются компоненты соответствующих главных собственных векторов и векторов приоритетов системы по отношению к отдельным показателям качества системы $\bar{Q}_j, j = \overline{1, n}$.

С использованием полученных векторов приоритетов вычисляются значения компонент вектора глобальных приоритетов \vec{C} согласно

$$C_i = \sum_{j=1}^n P_j Q_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где N – число сравниваемых вариантов систем.

По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов (4) выбирается соответствующий предпочтительный вариант системы.

III. Выбор предпочтительного варианта протокола маршрутизации на основе метода анализа иерархий

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного варианта протокола маршрутизации в ad-hoc сетях с учетом совокупности показателей качества. В качестве показателей качества выбраны основные характеристики протоколов, в частности, время конвергенции, память, управление. В табл. 2 приведены оценки значений показателей качества для различных типов протоколов маршрутизации [5].

Таблица 2. Показатели качества протоколов маршрутизации

Тип протокола маршрутизации	Показатели качества протоколов		
	Время конвергенции	Память	Управление
DSDV	$O(D \cdot I)$	$O(N)$	$O(N)$
OLSR	$O(D \cdot I)$	$O(N^2)$	$O(N^2)$
WRP	$O(h)$	$O(N^2)$	$O(N)$
AODV	$O(2 \cdot D)$	$O(2 \cdot N)$	$O(2 \cdot N)$
DSR	$O(2 \cdot D)$	$O(2 \cdot N)$	$O(2 \cdot N)$

В табл. 2 приведены соотношения, которые определяют зависимости показателей качества от основных характеристик сети, в частности, $O(\)$ – означает порядок сложности; D – диаметр сети; I – среднее время обновления; N – количество узлов в сети; h – высота дерева маршрутизации. Эти показатели качества связаны между собой и носят конкурирующий характер.

На рис. 1 показано иерархическое представление проблемы выбора предпочтительного протокола маршрутизации. На уровне 1 находится цель выбора предпочтительного варианта протокола, на уровне 2 – показатели качества протоколов, на третьем – альтернативные варианты протоколов.

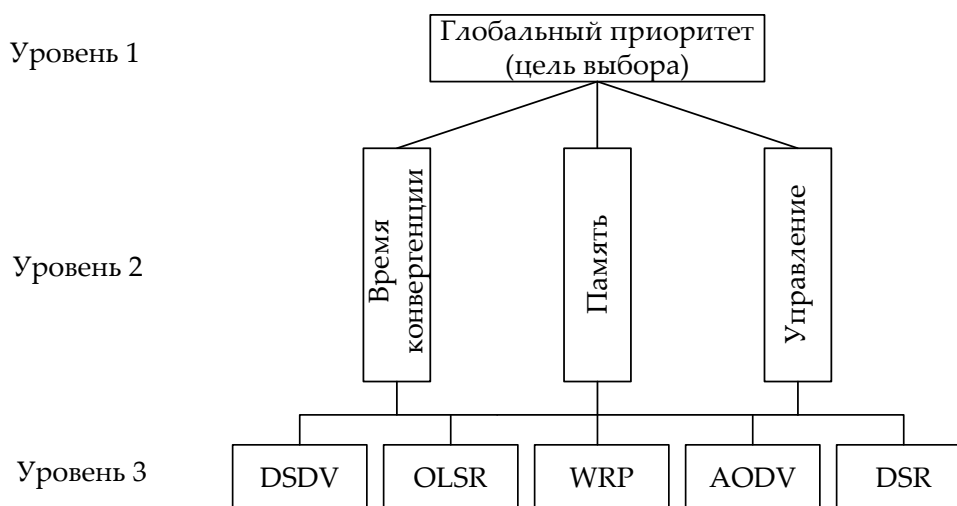


Рис. 1 Декомпозиция проблемы выбора

Согласно МАИ построена матрица парных сравнений для совокупности показателей качества (т.е. уровне 2) (табл. 3). Для заполнения этой таблицы с помощью опытного эксперта выполнены парные сравнение важности выбранных показателей качества, определяющих сложность протоколов маршрутизации, в частности, время конвергенции, память, управление. Диагональ этой матрицы заполнена значениями "1", а элементы матрицы, лежащие ниже диагонали, заполнены обратными значениями.

Таблица 3. Матрица парных сравнений показателей качества протоколов маршрутизации и вычисленные оценки компонент вектора приоритетов

	Время конвергенции	Память	Управление	Компоненты собственного вектора V_j	Компоненты вектора приоритетов P_j
Время конвергенции	1	1/3	1/5	0,405	0,1006
Память	3	1	1/4	0,909	0,226
Управление	5	4	1	2,71	0,673

Далее выполнены парные сравнения на уровне 3 в виде относительной сложности альтернативных вариантов протоколов по отношению к каждому показателю качества. В результате обработки полученных матриц вычислены согласно (2) и (3) собственные векторы и векторы приоритетов, которые приведены в табл. 4, 5, 6.

Таблица 4. Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации по отношению к времени конвергенции

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	Компоненты собственного вектора V_{i1}	Компоненты вектора приоритетов Q_{i1}
DSDV	1	1/2	4	5	5	2,186	0,323
OLSR	2	1	4	5	5	2,885	0,427
WRP	1/4	1/4	1	1/3	1/3	0,368	0,054
AODV	1/5	1/5	3	1	2	0,752	0,111
DSR	1/5	1/5	3	1/2	1	0,569	0,084

Таблица 5. Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации по отношению к памяти

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	Компоненты собственного вектора V_{i2}	Компоненты вектора приоритетов Q_{i2}
DSDV	1	1/4	1/4	1/3	1/3	0,368	0,06
OLSR	4	1	2	3	3	2,352	0,384
WRP	4	1/2	1	3	3	1,782	0,291
AODV	3	1/3	1/3	1	2	0,918	0,15
DSR	3	1/3	1/3	1/2	1	0,698	0,114

Таблица 6. Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации по отношению к управлению

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	Компоненты собственного вектора V_{i3}	Компоненты вектора приоритетов Q_{i3}
DSDV	1	1/5	1/2	1/3	1/3	0,026	0,004
OLSR	5	1	5	3	3	2,954	0,459
WRP	2	1/5	1	1/3	1/3	0,534	0,083
AODV	3	1/3	3	1	2	1,428	0,222
DSR	3	1/3	3	1/2	1	1,485	0,231

В табл. 7 сведены полученные оценки компонент вектора приоритетов показателей качества, а также векторов приоритетов протоколов маршрутизации, по отношению к времени конвергенции, памяти, управлению. С использованием этих векторов приоритетов вычислены значения компонент глобального вектора приоритетов согласно (6), которые приведены в последнем столбце табл. 7. По максимальному значению компонент вектора глобальных приоритетов \tilde{N}_i выбирается предпочтительный вариант протокола маршрутизации в ad-hoc сетях с учетом введенных показателей качества. Таким является протокол маршрутизации OLSR, основанный на алгоритме Дейкстры.

Таблица 7. Результаты вычисления значений компонент глобального вектора приоритетов

№	Тип протокола маршрутизации	Q_{i1}	Q_{i2}	Q_{i3}	C_i
1	DSDV	0,323	0,06	0,004	0,048
2	OLSR	0,427	0,384	0,459	0,438
3	WRP	0,054	0,291	0,083	0,127
4	AODV	0,111	0,15	0,222	0,194
5	DSR	0,084	0,114	0,231	0,189
	P_j	0,1006	0,226	0,673	

Выводы

1. Проведен анализ наиболее часто применяемых в ad-hoc сетях проактивных протоколов DSDV, OLSR, WRP, а также реактивных протоколов AODV, DSR. В качестве показателей качества выбраны основные характеристики протоколов, в частности, время конвергенции, память, управление.

2. Рассмотрены практические особенности применения одного из методов многокритериального выбора предпочтительного варианта – метода анализа иерархий. Получены матрицы парных сравнений показателей качества и вариантов протоколов маршрутизации, для которых вычислены их главные собственные векторы и векторы приоритетов.

3. На основе полученных данных вычислен вектор глобальных приоритетов. По максимальному значению его компонент выбран предпочтительный вариант маршрутизации в беспроводных ad-hoc сетях, которым является протокол маршрутизации OLSR.

Список литературы:

1. Астраханцев А.А., Безрук В.М. Маршрутизация в сетях зв'язку. – Харків: Компанія СМІТ, 2011. – 367 с.
2. Cordeiro C.M., Agrawal D.P. Ad Hoc & Sensor Networks: Theory and Applications. – World Scientific, 2006. – 636 p.
3. Perkins C., Royer E. Ad hoc on-demand distance vector routing // Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. – 1999. – P. 99-100.
4. Toh C.-K. Associative-based routing for ad hoc mobile networks // Wireless Personal Communications Journal. Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems. – 1997. – 4(2). – P. 103-139.
5. Астраханцев А.А., Горбань С.М. Сравнительный анализ эффективности протоколов маршрутизации в ad-hoc сетях // Инфокоммуникационные системы. – 2013. – №3. – С. 156-159.
6. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций. – Харьков: Компания СМІТ, 2017. – 268 с.

UDC 621.391

FLOW-BASED BALANCING SOLUTION OF TRAFFIC POLICING



[MOHANAD NAJM ABDULWAHD](#), [ALI SALEM ALI](#)

Al Iraqia University

Abstract – The paper proposes a flow-based model of load balancing with a consistent solution of traffic profiling tasks and multi-path routing in conditions of network operation close to overloading. The mathematical model is represented by algebraic equations and inequalities of network condition: the conditions for implementing multipath routing, the equations of flow conservation, the conditions for preventing overloading of communication links and the network as a whole, as well as the conditions for balancing possible service failures on the network edge. The model describes a multi-flow case, which allowed simulating variants of simultaneous joint transmission of packets of several heterogeneous flows between different pairs of network routers. Using the proposed model, the load balancing problem was reduced to the solution of the optimization problem of linear programming. At the same time, the criterion was the minimum of the upper dynamically controlled failure threshold for all flows in the network as a whole. A number of numerical examples demonstrated the efficiency and adequacy of the proposed model and the effectiveness of the final solutions. The study of load balancing processes using the proposed model showed that the restriction of the intensity of flows at the network edge is adaptive: flows with greater intensity have been limited to a greater extent. It is their role in the emerging network overloading that was crucial. The development of the proposed approach is seen in the consideration of the case of differentiated flow restrictions on the network edge, taking into account their key parameters affecting the QoS level, for example, a priority and length of packets, IP and MAC addresses, TCP/UDP port numbers, etc.

Анотація – В роботі запропонована потокова модель балансування навантаження при узгодженому рішенні задач профілювання трафіка і багатошляхової маршрутизації в умовах функціонування мережі, близьких до перевантаження. Математична модель представлена алгебраїчними рівняннями і нерівностями стану мережі: умовами реалізації багатошляхової маршрутизації, рівняннями збереження потоку, умовами запобігання перевантаження каналів зв'язку та мережі в цілому, а також умовами балансування можливих відмов в обслуговуванні на кордоні мережі. Модель описує багатопотоковий випадок, що дозволило розглядати варіанти спільної передачі пакетів одночасно декількох різномірних за своїми характеристиками потоків між різними парами маршрутизаторів мережі.

Аннотация – В работе предложена потоковая модель балансировки нагрузки при согласованном решении задач профилирования трафика и многопутевой маршрутизации в условиях функционирования сети, близких к перегрузке. Математическая модель представлена алгебраическими уравнениями и неравенствами состояния сети: условиями реализации многопутевой маршрутизации, уравнениями сохранения потока, условиями предотвращения перегрузки каналов связи и сети в целом, а также условиями балансировки возможных отказов в обслуживании на границе сети. Модель описывает многопоточковый случай, что позволило рассматривать варианты совместной передачи пакетов одновременно нескольких разнородных по своим характеристикам потоков между различными парами маршрутизаторов сети.

Introduction

The main challenges in modern Telecommunication Networks (TCN) concern with providing Quality of Service (QoS) in conditions of network overload. TCN overload can significantly increase such parameters as packet delay, jitter and packet loss. The main reason of the transport TCN overload is not failures of reliable communication equipment, but

excessive load on the network. In this regard, it is special demands to traffic shaping arise that are responsible for regulation of the incoming packets rate to the transport network [1].

Performance of Traffic Shaping (TS) and Traffic Policing (TP) mechanisms are mainly determined by effectiveness of mathematical models and methods which they based on [2]. Currently used schemes in TS/TP like Token Bucket and Leaky Bucket are relevant to heuristic solutions which do not satisfy the demands in relation to differentiation of quality of service and consistent work with other traffic management mechanisms, for example, routing protocols, because of their main responsibility about serving the critical network load. Due to the streaming nature of modern network traffic the future models and methods of traffic shaping are tend to be flow-based [3-6].

In the field of streaming modeling there are known several approaches to combined mathematical description of multipath routing and traffic shaping processes [5, 6]. However the problem of traffic shaping for the case of overloaded network operation wasn't previously studied. In addition, it is important that the process of limiting the flow rate in traffic shaping must be of balanced (fair) manner, i.e. all flows shaped differentially in accordance with the concept of Traffic Engineering (TE) [7, 8]. Therefore, the actual scientific problem seems related to the development of mathematical models of multipath routing and balancing the flow of rejections in telecommunication network overload conditions.

I. Flow-based balancing solution of traffic policing

Within the study the model proposed in [5], [6] taken as a basis. In routing model the network structure is represented by weighted oriented graph $G = (V, E)$, where V is a set of vertices (routers), and E is a set of graph arcs (links). Every link $(i, j) \in E$ is weighted by the parameter $c_{i,j}$ characterizing the throughput of the modeling communication link. Let S_k and D_k be source and destination nodes of the k -th flow, and r^k (bps) be the k -th flow rate from the set K . Quantity $x_{i,j}^k$ is a control variable, which characterizes the part of k -th flow of the link $(i, j) \in E$. In accordance with the physics of the multipath routing problem being solved the following restrictions for the variables are needed:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (1)$$

For the purpose of network nodes overload prevention it is necessary to meet the condition of flow conservation on the nodes (source, transit and destination) [5, 6]:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 1 - y^k, & i = S_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 0, & i \neq S_k, D_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = y^k - 1, & i = D_k, \end{cases} \quad (2)$$

where y^k is a control variable too, which characterizes the part of k -th flow denied of service on the edge router (S_k); S_k is a source node; D_k is a destination node.

There are also some constraints associated with rejection variables in relation to their physical meaning and implemented strategy of load balancing:

$$0 \leq y^k \leq \alpha, \quad (3)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad (4)$$

where α is dynamically managed upper bound of rejections for all flows in a whole network.

Also, to prevent the communication links overload the next conditions must be met:

$$\sum_{k \in K} r_k \cdot x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, \quad (i, j) \in E. \quad (5)$$

With realization of single path routing flow conservation condition (2) converted to the form:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 1, & i = S_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 0, & i \neq S_k, D_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k = 1, & i = D_k, \end{cases}$$

while conditions of prevention communication links overload (5) substituted by system of nonlinear constraints:

$$\sum_{k \in K} (1 - y^k) \cdot r_k \cdot x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, \quad (i, j) \in E.$$

In solving the routing and policing problems it is reasonable to minimize the following objective function:

$$J = \alpha \rightarrow \mathbf{min}. \quad (6)$$

Using the criterion (6) provides balanced denials of service at the network edge for all user flows. Thus, within the proposed model (1)-(6) consistent solution of problems of multipath routing with traffic policing rejection balancing converged to solution of the linear programming optimization problem with optimality criterion (6) in the presence of constraints (1)-(5).

II. Research of traffic policing balancing

Within the investigation, consider an example of routing the two flows with varying rate, which make the network overload (Fig. 1). Suppose that a network structure consists of six nodes and eleven links. On a network links are given their throughputs (1/s) shown on a Fig. 1. The source of the first flow is first router, while fifth router is the source for the second flow. Destination of the packets of first and second flows is the third router.

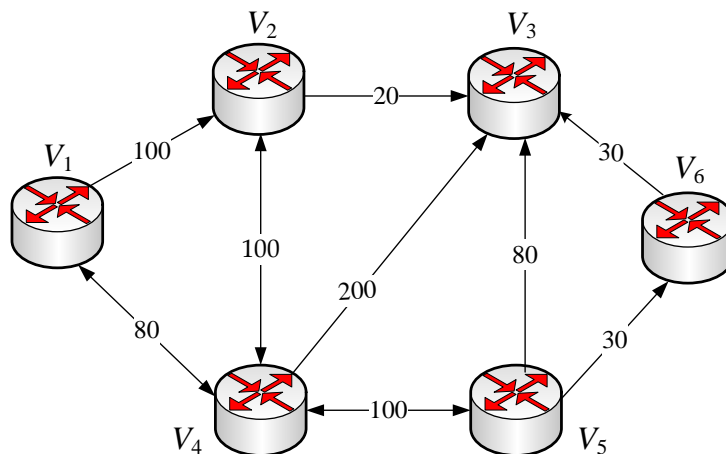


Fig. 1. Example of network structure

Fig. 2 shows an example of solving problem of multipath routing and balancing the flow of rejections in conditions of telecommunication network overload: rates of first and second flows are both 200 1/s. On communication links (Fig. 2) in the numerator of fraction is specified the first flow rate, and in the denominator the rate of the second flow.

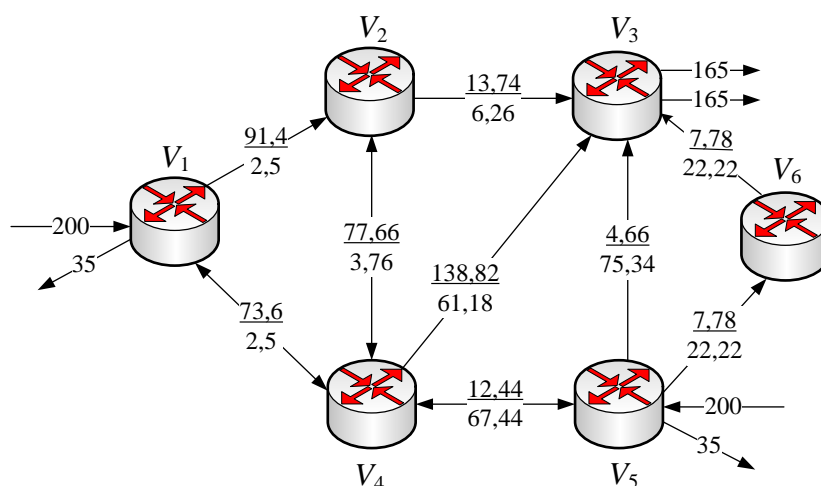


Fig. 2. Results of solving routing and policing problem with flow rates $r_1 = r_2 = 200$ 1/s

As a result of consistent solution of routing and rejections balancing problem both flows have been limited by the same rate of access equal to 35 1/s, while the destination node (third router) received packets with the rate of 165 1/s. In this case, the dynamically managed upper bound of rejections for these flows is equal to $\alpha = 0,175$.

In the case when flow rates are different, for example, $r_1 = 200$ 1/s and $r_2 = 150$ 1/s, the nature of rejections also changed (see Fig. 3). More rejections appeared in the first flow with higher rate, which mainly affected the occurrence of network overload. First flow packets received by a third router with rate of 180 1/s, and packets of the second flow received with rate of 138,45 1/s. Thus, in the second case, the dynamically managed upper bound of rejections for these flows is equal to $\alpha = 0,1$.

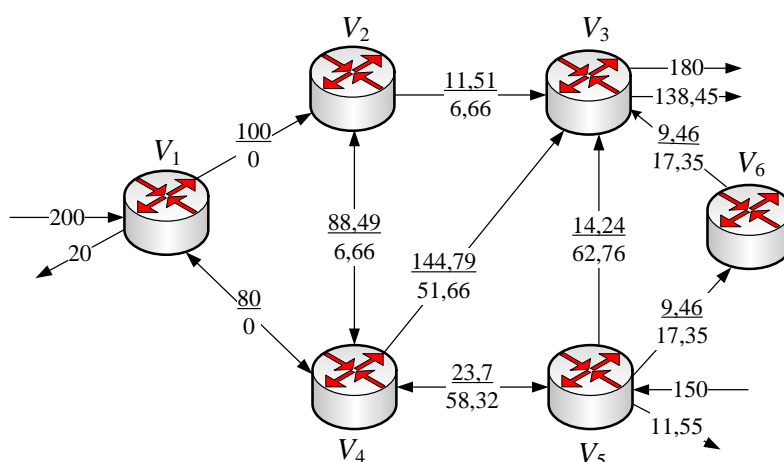


Fig. 3. Results of solving routing and policing problem with flow rates $r_1 = 200$ 1/s, $r_2 = 150$ 1/s

However, in both cases during flows routing network links were not overloaded. This result was achieved by adaptive limiting rates of each of the incoming flows.

Conclusions

To ensure the specified level of service quality with minimum use of available network resources should be possible a consistent solution of problems of traffic management, where the key problems are routing and traffic shaping. Routing defines the procedure for the distribution of flows within the network, while the traffic shaping is responsible for restriction of incoming flow rates at the network edge. Thus, the general function of these processes is to prevent network overload.

In the study proposed the flow-based model of multipath routing with traffic policing rejection balancing, which is represented by algebraic equations and inequalities of network state, such as conditions for implementation of multipath routing (1), flow conservation equations (2), conditions of overload prevention in communication links and a whole network (5), as well as balancing conditions of possible denials of service at the network edge (3), (4). The model describes a multiflow case, allowing simulation of concurrent transmission diverse by characteristics packet flows between different pairs of network routers.

Within the proposed model (1)-(6) consistent solution of problem of multipath routing with traffic policing rejection balancing converged to solution of optimization problem of linear programming with the optimality criterion (6) in the presence of constraints (1)-(5). Besides, as criterion was chosen the minimum of dynamically managed upper bound of rejections for all flows in a whole network. For solving the mentioned above linear programming problem can be used the following methods: simplex algorithm of Dantzig, criss-cross algorithm, ellipsoid algorithm, projective algorithm of Karmarkar, and path-following algorithms.

In the case of single path routing optimization problem associated with minimization of expression (6) belongs to the class of nonlinear programming due to the fact that prevention overload conditions will take the nonlinear character.

Numerical examples of multipath routing with traffic policing rejection balancing problem solving confirmed the adequacy and effectiveness of the proposed solution. Investigation of processes of multipath routing with traffic policing rejection balancing using the proposed model (1)-(6) showed that the flow rate restriction on the network edge has an adaptive nature: flows with higher rate limited to a greater extent, because of their responsibility on network overload.

Further development of proposed approach is seen in differentiated restriction of flows at the network edge based on their key parameters affecting the level of QoS, such as priority and packet length, IP and MAC-addresses, TCP/UDP-ports and others.

References:

1. *Álvarez S.* QoS for IP/MPLS networks. // Cisco Press, 2006. – 299 p.
2. *Vegesna S.* IP Quality of Service. Cisco Press, 2001. – 343 p.
3. *Lemeshko O., Vavenko T., Ovchinnikov K.* Design of multipath routing scheme with load balancing in MPLS-network // XIIth International Conference «The Experience Of Designing And Application of CAD Systems in Microelectronics», Polyana-Svalyava-(Zakarpattya), UKRAINE 19-23 February 2013: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. – P. 211-213.
4. *Lemeshko A.V., Vavenko T.V., Goriunov A.A.* Design of model of load-balancing routing for software defined networks // 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Proceedings of 23rd CriMiCo`2013: September 2013, Ukraine. – Vol. 1. – P. 511 – 512.
5. *Lemeshko O.V., Yevseyeva O.Yu., Garkusha S.V.* A Tensor Model of Multipath Routing Based on Multiple QoS Metrics // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. - P. 1-4.
6. *Lemeshko O.V., Garkusha S.V., Yeremenko O.S., Hailan A.M.* Policy-based QoS management model for multiservice networks // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015, Omsk, Russia. Publisher: IEEE. – P. 1-4.
7. *Osborn E., Simba A.* Traffic Engineering with MPLS. – Cisco Press, 2002. – 608 p.
8. *Seok Y., Lee Y., Kim C., Choi Y.* Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks // IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. – 2001. – №3. – P. 348 – 353.

УДК 621.396.43

ОБҐРУНТУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ



[Г.Л. Авдеєнко](#), [С.Г. Бунін](#), [Т.М. Наритник](#), [А.В. Єрмаков](#)

Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»

[В.В. Волков](#)

Одеський обласний радіотелевізійний передавальний центр

Abstract – The necessity of terahertz frequency range use for the future ultrahigh-speed radio relay lines deployment is shown. Based on the conducted literature analysis, it is shown that in 30-300 GHz frequency range the most important type of signal fading that should be taken into account for radio link design are fading due to signal attenuation by hydrometeors (rain drops) and fading due to the absorption of radio signals in atmospheric gases. The features of the terahertz wave attenuation by hydrometeors, in particular in rains, of variable intensity are considered in detail. Based on the results of the conducted researches, we get that frequency ranges 110-150 GHz and 220-310 GHz are most suitable and promising frequency bands for design of ultra high-speed and ultra-wideband wireless telecommunication systems. This is because radio link designers can use large bandwidths of 40-90 GHz in transceivers and receivers in order to increase significantly the information capacity, the secrecy and protection against detecting and unauthorized access to transmitted information. The results of range calculations of the radio relay line of terahertz frequency band for 2 GHz and 40 GHz receiver's band of are shown. This calculations show the possibility of creating radio relay lines with point-to-point range of at least 1 km.

Анотація – Обґрунтовано необхідність переходу до використання терагерцового діапазону частот при розортанні майбутніх радіорелейних ліній зв'язку надвисокої пропускної здатності. Розглянуто основні фактори, що призводять до виникнення замирань в радіорелейних лініях зв'язку. Показано, що в терагерцовому діапазоні найбільший вплив на енергетичний потенціал радіорелейних ліній чинять затухання в гідрометеорах. Виділено ділянки частот терагерцового діапазону, які найбільш за все придатні для використання в радіорелейних лініях зв'язку.

Аннотация – Обоснована необходимость перехода к использованию терагерцового диапазона частот при развертывании будущих радиорелейных линий связи сверхвысокой пропускной способности. Рассмотрены основные факторы, приводящие к возникновению замираний в радиорелейных линиях связи. Показано, что в терагерцовом диапазоне наибольшее влияние на энергетический потенциал радиорелейных линии оказывают затухания в гидрометеорах. Выделены участки частот терагерцового диапазона, наиболее всего пригодные для использования в радиорелейных линиях связи.

Вступ

В даний час в мережах зв'язку існує нагальна потреба в широкосмутовому безпроводовому обладнанні, здатному підтримувати високі швидкості передачі даних та нестисненого HD-відео. Тому у розробників телекомунікаційної апаратури є ве-

ликий інтерес до високошвидкісних безпроводових технологій терагерцового діапазону частот, оскільки вони можуть забезпечити достатню пропускну здатність каналів передачі.

Частотний діапазон в смузі від 57 до 66 ГГц, так званий діапазон 60 ГГц, закріплений в стандартах IEEE 802.15.3c і IEEE 802.15.ad (WiGig), в основному використовується для внутрішнього застосування при розгортанні офісних мереж, так як атмосферне резонансне загасання в кисні дуже велике (на рівні 16 дБ/км). Для великих відстаней при організації фіксованого безпроводового доступу (FWA), для транспортної розподільчої мережі мобільного зв'язку (mobile backhaul) четвертого (4G) та п'ятого покоління (5G), для високопродуктивних обчислювальних машин за кордоном активно впроваджуються безпроводові системи в діапазонах частот 71-76 ГГц, 81-86 ГГц, 92-95 ГГц та в діапазоні 120 ГГц, оскільки атмосферне загасання в цих діапазонах частот значно менше (близько 1 дБ/км), ніж у діапазоні частот 60 ГГц. Ведуться роботи з дослідження частотних діапазонів вище 200 ГГц для безпроводових телекомунікацій з використанням останніх досягнень в комбінації технологій електроніки та фотоніки. Ключовими елементами такої системи є створені на базі розроблених монолітних (інтегральних) мікросхем радіоелектронні приймально-передавальні пристрої, здатні формувати і передавати достатньо потужні для цього частотного діапазону модульовані сигнали зі швидкістю 10 Гбіт/с і приймати сигнали з досить високою чутливістю.

Науково-дослідний Інститут телекомунікацій НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» разом з Інститутом електроніки та зв'язку Української академії наук також приймають активну участь у дослідженні властивостей терагерцового діапазону, розробці радіоелектронних компонентів та створенні на цій основі телекомунікаційної апаратури різного призначення, зокрема приймально-передавального тракту терагерцового діапазону, що працює в діапазоні 130-132 ГГц [23-24].

I. Актуальність проблематики досліджень

На сьогодні вичерпаність частотного ресурсу нижче 30 ГГц при розгортанні цифрових радіорелейних ліній (ЦРРЛ) у великих мегаполісах та зростання об'єму інформації, що повинна передаватися, вимагає освоєння смуг радіочастот вище за 30 ГГц, наприклад 71-76 ГГц та 81-86 ГГц, радіорелейне обладнання для яких на швидкості до 5 Гбіт/с при максимальній протяжності інтервалу в 5,2 км вже з'явилося на телекомунікаційному ринку [10]. Вказане відноситься також й до більш високого діапазону – терагерцового діапазону електро-магнітних хвиль, розробка засобів та технологій ефективного використання якого є запорукою створення майбутніх надвисокошвидкісних транспортних систем передачі даних, які будуть основою для побудови мереж стільникового зв'язку 5G. Зокрема, Хіросімський університет, Національний Інститут інформатики і комунікаційних технологій і корпорація Panasonic на Міжнародній конференції ISSCC 2017 (США, Сан-Франциско, штат Каліфорнія) повідомили про спільно розроблений передавач для лінії зв'язку терагерцового діапа-

зону, який дозволяє передавати цифрові дані зі швидкістю 105 Гбіт/с на один канал в смузі частот від 290 до 315 ГГц. Отримана продуктивність вище на порядок, ніж у мобільних мереж п'ятого покоління (5G) [11].

В даний час в Україні для роботи систем фіксованого безпроводового зв'язку фіксованої служби виділені і використовуються окремі смуги частот в діапазоні від 60 МГц до 95 ГГц з урахуванням умов їх використання. Постановою Кабінету Міністрів України №838 від 05.09.2012р. до Плану використання радіочастотного ресурсу України (розділ II - перспективні технології) внесена радіотехнологія радіорелейного зв'язку в діапазонах частот 94,1-100 ГГц; 102-105 ГГц; 106,5-109,5 ГГц; 111,8-113 ГГц; 130-134 ГГц; 141-148,5 ГГц, тобто і в терагерцовому діапазоні.

Відмітимо також, що існуючі діапазони частот нижче 30 ГГц вже майже повністю використовуються, що спричиняє великі проблеми при необхідності створення нових безпроводових ліній високошвидкісного зв'язку. Терагерцовий діапазон (100–3000 ГГц), який сьогодні в більшій його частині поки що не ліцензується, дозволяє в значній мірі вирішити вказану проблему. При цьому необхідним і доцільним є дослідження особливостей поширення терагерцових хвиль в атмосфері в широкому діапазоні частот для подальшого використання отриманих результатів при проектуванні ефективних надширококутових телекомунікаційних систем.

II. Особливості поширення терагерцових хвиль в атмосфері

На поточний момент в світовій практиці не існує універсального методу, що забезпечуватиме надійне прогнозування якісних показників цифрових радіорелейних ліній (ЦРРЛ). Це призводить до великої похибки результатів розрахунку якісних показників за методами різних фірм, що використовують різні підходи в оцінці впливу факторів поширення радіохвиль на стійкість роботи ЦРРЛ. Також при поширенні електромагнітних хвиль в атмосфері є декілька відомих видів завмирань сигналу, що актуальні в діапазоні до 30 ГГц, які в діапазоні терагерцових хвиль будуть мати мінімальні значення, а деякими взагалі можливо знехтувати. Відповідно певні види завмирань, що не є критичними та суттєвими в більш низьких частотних діапазонах, навпаки будуть мати значний вплив на роботу ЦРРЛ.

Проведений авторами аналіз робіт [11-19] показав, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань (рефракційні завмирання внаслідок екрануючого впливу перешкод, рефракційні завмирання інтерференційного типу, інтерференційні завмирання внаслідок відбиття від неоднорідностей шарів тропосфери, завмирання внаслідок екрануючого впливу неоднорідностей шарів атмосфери, завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен (для терагерцового діапазону – це неточність юстировки антен, а також вітрової навантаженості на антенні опори), завмирання внаслідок послаблення радіосигналу гідрометеорами (дощ, сухий та мокрий сніг, град, туман, хмари), завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах, завмирання радіосигналу в піщаних та пилових бурях) найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є наступні:

- завмирання внаслідок послаблення сигналу гідрометеорами;
- завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах (в першу чергу парах води та молекулярному кисні);
- завмирання внаслідок впливу діаграм спрямованості антен.

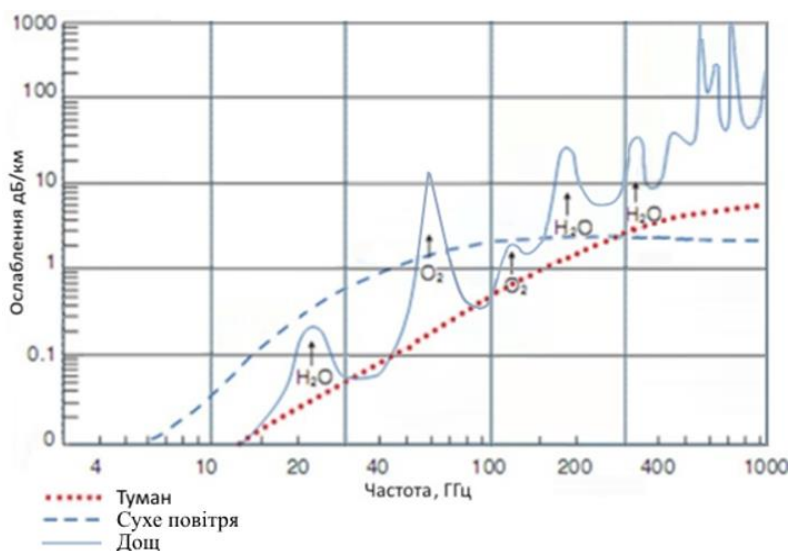
Робота радіорелейних ліній на таких високих частотах (особливо в терагерцовому діапазоні) через високу спрямованість антен кореспондуючих станцій дозволяє практично не враховувати інтерференцію електромагнітних хвиль, відбитих від перешкод в зоні поширення сигналу, яка виникає особливо в умовах щільної міської забудови. Розраховане значення найбільшого значення радіусу першої зони Френеля посередині траси довжиною 5 км складає величину 2,3 м на частоті 140 ГГц і не перевищуватиме 1,6 м на частоті 300 ГГц і, отже, це дає право не враховувати рефракцію і інтерференційні завмирання при розрахунку енергетичного бюджету цифрових радіорелейних ліній терагерцового діапазону, що планується.

III. Особливості затухання терагерцових хвиль внаслідок поглинання радіосигналу в газах

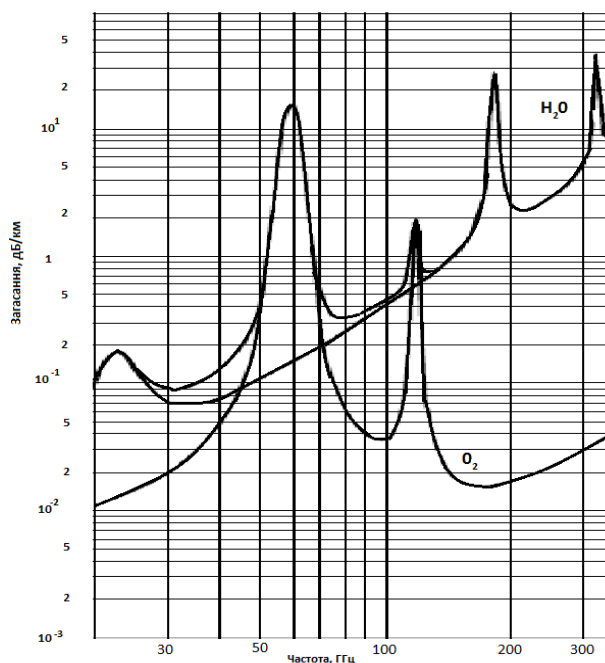
Затухання в атмосфері терагерцових хвиль до частот 300 ГГц виникає здебільшого внаслідок присутності в повітрі парів кисню та води. Інші гази вносять незначний внесок в величину затухання терагерцових хвиль. На рис. 1 зображено результати дослідження залежності величини затухання радіохвиль від частоти, проведене 1996 року Міжнародним союзом електрозв'язку (далі ІТУ) при нормальних параметрах атмосфери (температура 15 С°, тиск 1013 hPa (10² Pa) та густині водяного пару 7.5 г/м³) в безпосередній близькості від Землі. Одна крива досліджувала вплив кисню (крива O₂ – сухе повітря), інша – вплив парів води.

Результати показали, що піки затухання внаслідок резонансної взаємодії радіохвилі з молекулою кисню утворилися в смузі частот 50-70 ГГц з максимумом на частоті 60 ГГц та на частоті 118 ГГц. Піки затухання внаслідок взаємодії електричних моментів води та радіохвилі утворилися на частоті 22,2 ГГц та на частоті 183 ГГц. На інших частотах спостерігалися менші величини затухання, тому діапазони між піками і назвали радіовікнами. Іншими словами, вибираючи частоти, що знаходяться у радіовікні, можна суттєво зменшити вплив параметрів атмосфери на радіолінію.

Точні розрахунки затухання в молекулах кисню та води були отримані з тих же досліджень 1996 року (пізніше результати увійшли до рекомендації ІТУ-R P.676). При цьому зазначимо, що для відстаней до 5 км, які характерні для радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні, працює модель, для якої затухання в газах γ_g (дБ/км) отримується як сума затухань в сухому повітрі γ_0 та затухання в парах води γ_w .



а)



б)

Рис. 1. Залежність величини затушення від частоти з врахуванням (а) та без врахування (б) впливу дощу, розрахована ІТУ в 1996 році (Rec.676)

IV. Особливості затушення терагерцових хвиль внаслідок послаблення радіосигналу гідрометеорами

Погонне затушення у дощі γ_d (дБ/км) визначається інтенсивністю дощу R (мм/час). На рис. 2 зображено частотні характеристики затушення для дощу з різними інтенсивностями та законами розподілу крапель води (різними моделями).

Представлені моделі більш докладно розглянуто в рекомендації Р.838 ІТУ-Р [11]. Проаналізувавши залежності на рис. 2, можна зробити логічний висновок, що при збільшенні частоти терагерцових хвиль, згасання в дощі також монотонно збільшується, досягаючи десятків децибел на кілометр.

В роботі [19] проведені дослідження частотної залежності коефіцієнта ослаблення радіохвиль суб- та терагерцового діапазонів у дощах при врахуванні дрібноканалної фракції як функції розподілу крапель за розмірами. З переходом від надвисокочастотного діапазону на більш високі частоти субтерагерцового діапазону розміри дрібних дощових крапель (діаметром 0,05-0,6 мм) порівняні з довжиною хвилі, і в них виникають відомі резонанси Ми, які також надають досить сильний вплив на електромагнітне випромінювання.

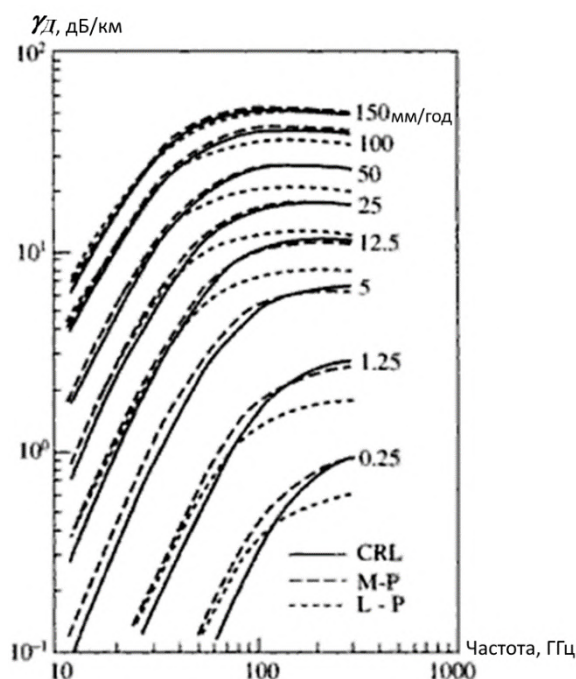


Рис. 2. Частотні характеристики згасання в залежності від закону розподілу крапель води в дощі: CRL – CRL модель, яка заснована на спостереженні згасання терагерцових хвиль в атмосфері, M-P – модель Маршала-Палмера, L-P – модель Ло – Парсона

Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності (2,5 мм/год. – слабкий дощ; 12,5 мм/год. – помірний дощ; 50 мм/год. – зливи) при температурі 20°C, які зроблені на основі запропонованої нової функції розподілу [19], що враховує наявність дрібних дощових крапель, і експериментальні дані з джерел [20, 21] представлені в табл. 1.

На рис. 3 показана частотна залежність погонного згасання хвиль у надвисоко-частотному і терагерцовому діапазонах у дощі з інтенсивністю $I_d=50$ мм/год (точками представлені експериментальні дані). Проведений розрахунок дав задовільний збіг з

існуючими експериментальними даними при різних інтенсивностях дощу на частотах до 300 ГГц.

Таблиця 1. Результати обчислень коефіцієнтів ослаблення у дощах різної інтенсивності

Вид атмосфери	Частота радіосигналу, ГГц							
	30	60	90	120	140	165	250	300
1. Дощ слабкий (1 ÷ 5 мм/год)	0,9	2,1	3,4	4,7	5,4	7,1	9,8	14,3
2. Дощ сильний (20 ÷ 40 мм/год)	7,0	14,0	15,2	16,3	17,0	20,2	30,5	42,3
3. Мокрий сніг (10 мм/год)	1,7	4,9	7,7	10,7	12,4	15,3	22,8	28,7
4. Хмари потужні купчасті	3,5	8,0	9,5	12,9	15,1	18,9	27,5	33,2
5. Газ (кисень)	-	15,0	0,05	1,8	0,5	0,02	0,02	0,03
6. Газ (водяна пара)	0,07	0,1	0,2	0,5	0,8	2	2,5	5,5

Затухання терагерцових хвиль в сухому снігу є малим. В декілька разів зростає величина затухання в мокрому снігу або дощі тієї ж інтенсивності. Для порівняння досліди показали, що для частоти 88 ГГц на відстані 1,4 км затухання в сухому снігу склало лише 1 дБ, в той час коли в мокрому затухання вже дорівнювало 20 дБ. Висновок з цього наступний: внесок снігу в порівнянні з дощем тієї ж інтенсивності нехтовно малий.

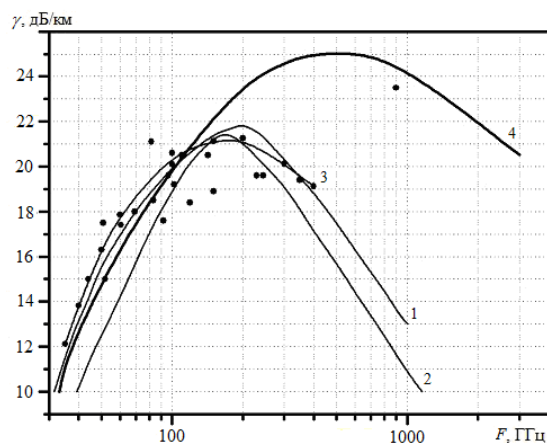


Рис. 3. Частотна залежність погонного затухання хвиль у надвисокочастотному і терагерцевому діапазонах у дощі з інтенсивністю $I_d=50$ мм/год

У випадку з туманом, для якого характерними є краплі води діаметром 0,1 мм і менше, що сконцентровані в обмеженому просторі затухання терагерцових хвиль до частот 300 ГГц незначні.

В табл. 2 та табл. 3 представлено результати розрахунків дальності дії безпроводової системи терагерцового діапазону 130 ГГц для випадків наявності дощу (із середньою інтенсивністю 35 мм/год) та відсутності дощу для смути робочих частот приймача 2ГГц та 40 ГГц, вихідної потужності передавача 50 мкВт та 50 мВт, коефіцієнті підсилення антен передавача та приймача, рівному 49 дБ, коефіцієнті шуму приймача 12 дБ, модуляції QPSK та відношенні SNR на вході приймача, рівному 16 дБ. В обох випадках погонне загасання в газах атмосфери відповідно до рис.1 прийнято рівним $\gamma_{\text{атм}} = 0,9$ дБ/км.

Таблиця 2. Результати розрахунків дальності дії безпроводової системи терагерцового діапазону для смути робочих частот приймача 2ГГц

Погодні умови	Дальність прольоту РРЛ, км			
	При вихідній потужності передавача 50мкВт		При вихідній потужності передавача 50 мВт	
	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ
Без дощу	1,50	139,599	13,58	169,601
В дощі	0,591	139,602	1,92	169,385

Таблиця 3. Результати розрахунків дальності дії безпроводової системи терагерцового діапазону для смути робочих частот приймача 40 ГГц

Погодні умови	Дальність прольоту РРЛ, км			
	При вихідній потужності передавача 50 мкВт		При вихідній потужності передавача 50 мВт	
	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ	Відстань, км (SNR = 16 дБ)	Сумарне ослаблення, дБ
Без дощу	0,377	126,587	6,393	156,588
В дощі	0,247	126,585	1,274	156,598

Висновки

Проведено аналіз характеристик траси поширення сигналу та визначення втрат сигналу в умовах радіорелейної лінії в терагерцовому діапазоні частот. На основі проведеного аналізу показано, що в діапазоні частот 30-300 ГГц з відомих типів завмирань найбільш вагомими, які слід враховувати при проектуванні, є завмирання внаслідок послаблення сигналу гідро метеорами та завмирання внаслідок поглинання радіосигналу в газах.

Показано, що робота радіорелейних ліній в терагерцовому діапазоні дозволяє практично не враховувати рефракцію та інтерференцію електромагнітних хвиль, що виникає особливо в умовах щільної міської забудови. Це пов'язано по перше з тим, що терагерцові хвилі мають низьку здатність до «огинання» перешкод, по друге, на

поточний момент частоти від 30 до 300 Гц застосовуються на відносно невеликих відстанях (до 5 км), що дозволяє при плануванні прольотів уникнути потрапляння перешкод в зону прямої видимості антен та першу зону Френеля.

Виходячи із результатів проведених досліджень, можна вважати найбільш придатними і перспективними при проектуванні високошвидкісних надширококутних безпроводових телекомунікаційних систем частотні діапазони 110-150 ГГц і 220-310 ГГц, де можна використовувати великі смуги частот шириною 40-90 ГГц для суттєвого збільшення інформаційної ємності, підвищення скритності та захисту від виявлення і несанкціонованого доступу інформації, що передається.

Список літератури:

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О., Наритник Т.М. Безпроводові системи зв'язку субтерагерцового та терагерцового діапазонів // Цифрові технології. – 2014. – Вип. 16. – С. 40-59.
2. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.N., Fisun A.I., Belous O.I. Terahertz range telecommunication systems // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – 70(16). – P.1477-1487.
3. Бунин С.Г., Долженко Д.О., Висоцький М.В., Плотник К.О. Застосування надширококутних імпульсних радіосигналів у супутникових системах і системах дальнього радіозв'язку // Наукові Вісті. – 2010. – № 6(74). – С. 5 – 10.
4. Кравчук С.О. Наритник Т.Н. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону. – Житомир: ФОП «Євенок О.О.».–2015.– 204.
5. Майборода І.М., Стороженко І.П., Бабенко В.П., Кайдаш М.В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016. – № 1 (27). – С.45-48.
6. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С.205-210.
7. Jastrow C., Munter K., Piesiewicz R., Kurner T., Kochand M., Kline-Ostmann T. 300 GHz transmission system // Electronics Letters. – 2008. – vol.44, No.3. – P.75-77.
8. Peter H. Siegel. Terahertz technology // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – Vol.50, No.3 – P.910-928.
9. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.N., Denbnovetskii S.V., May O.V., Lutchak O.V., Fisun A.I., Belous O.I. Modelling of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio paths // Telecommunication and Radio engineering. – 2016. – Vol.7, №1 – P.20-22.
10. ALCOMA AL80GE Technology for the Next Generation Networks. [Електронний ресурс]. – ALCOMA, 2017. – Режим доступу: <http://www.alcoma.com/media/document/brochure-en-alcoma-al80ge-150309.pdf>
11. Радиокommunikации догоняют по быстродействию оптоволокно [Електронний ресурс] // Компьютерное обозрение. – 2017 – Режим доступу до ресурсу http://ko.com.ua/radiokommunikacii_dogonyayut_po_bystrodejstviiyu_optovolokno_118895?BPCTRY=1.
12. Recommendation ITU-R P. 838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods / Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2005. – 9 p.

13. Данные о распространении радиоволн, требующиеся для разработки систем связи Земля- Космос, работающих в диапазоне 20 ТГц-375 ТГц. Рекомендация МСЭ-R P.1621-1. – Женева, 2005. – 15 с.
- 14 Recommendation ITU-R F.2107-1 «Characteristics and applications of fixed wireless systems operating in frequency ranges between 57 GHz and 134 GHz» / Intern.Telecommunication Union.– Geneva 2011. – 35 p.
15. Recommendation ITU-R P.676-5 «Attenuation by atmospheric gases»/Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2001. – 21 p.
16. Recommendation ITU-R P.837-4 «Characteristics of precipitation for propagation modeling» / Intern. Telecommunication Union. – Geneva, 2003. – 8 p.
17. *Sekine M, Lind G.* Rain attenuation of centimeter, millimeter and submillimeter waves // 12th European Microwave Conf.: proc. – Helsinki, 1982.– P.584–589.
18. *Сухонин Е.В.* К проблеме распространения миллиметровых волн в осадках // Успехи радиоэлектроники – 2002. – № 9. – С. 72–79.
19. *Ugai S., Kato K.* Fine structure of rainfall // Annales des Telecommunications. – 1977. – Vol. 32, №11–12. – P.422–429.
20. *Малышенко Ю.И., Роечко А.Н.* Частотный ход коэффициента ослабления радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в дождях при учете мелкокапельной фракции в функции распределения дождевых капель по размерам // ИРЭ НАН Украины, ISSN 1028–821X. – Радиофизика и электроника. – 2012. – Т. 3(17), № 1. – С.36–40.
21. *Бабкин Ю.С., Соколов А.В., Сухонин Е.В.* Измерение ослабления в дождях // Радиотехника и электроника. – 1970. – № 12. – С.2451–2453.
22. *Вишневский В., Фролов С., Шахнович И.* Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скорости // Электроника и связь – 2011. – №1. – С. 90-97.
23. *Ільченко М. Ю., Наритник Т.М., Радзіховський В.М., Кузьмін С.Є., Лутчак О.В.* Передавальний та приймальний радіотракти радіорелейних систем терагерцового діапазону // Цифрові технології. – 2015. – № 17. – С. 17-29.
24. *Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н.* Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – 2016. – №2. – С. 42-49.

УДК 621.396.43

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ ДЛЯ ПРИЙОМОПЕРЕДАВАЧА БЕЗПРОВОДОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ФІКСОВАНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ



[Г.Л. Авдеєнко](#), [М.Ю. Ільченко](#), [Т.М. Наритник](#), [А.В. Єрмаков](#),
[О.В. Лутчак](#)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Abstract – Results of simulation and development of the frequency converter for the study of DVB-S standard satellite TV signal parameters change during its transmission through the prototype of the terahertz range transceiver of new fixed service wireless telecommunication system are presented. The proposed frequency converter consist of double balanced mixer, frequency synthesizer, bandpass filter and RF amplifier. The analysis of the obtained results testifies possibility of broadband signals transmission with a low level of distortion through the prototype of terahertz range transceiver. These results in the future also open up the possibility to investigate the distortion of ultra-wideband signals in time domain when its transmitted through this prototype. This work can be useful for developers of telecommunication equipment such as radio relay communication and satellite communication systems.

Анотація – Представлено результати імітаційного моделювання та розробки перетворювача частоти для дослідження зміни параметрів сигналу цифрового супутникового телебачення стандарту DVB-S при його передаванні через вітчизняний дослідний зразок прийомопередавача нової безпроводової телекомунікаційної системи фіксованого зв'язку терагерцового діапазону. Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість передавання через дослідний зразок прийомопередавача терагерцового діапазону широкопосмугових сигналів з малим рівнем спотворень, що в майбутньому відкриває можливість й для дослідження спотворень часової форми надширокопосмугових сигналів при їх передаванні через цей дослідний зразок.

Аннотация – Представлены результаты имитационного моделирования и разработки преобразователя частоты для исследования изменения параметров сигнала цифрового спутникового телевидения стандарта DVB-S при его передаче через отечественный опытный образец приемопередатчика новой беспроводной телекоммуникационной системы фиксированной связи терагерцового диапазона. Анализ полученных результатов свидетельствует о возможности передачи через опытный образец приемопередатчика терагерцового диапазона широкополосных сигналов с малым уровнем искажений, что в будущем открывает возможность и для исследования искажений временной формы сверхширокополосных сигналов при их передаче через этот опытный образец.

Вступ

Однією із перспективних сфер застосування терагерцових технологій є системи телекомунікацій [1-9]. Зокрема в телекомунікаціях передбачається створення принципово нових за габаритами, заводозахищеністю та енергоефективністю пристроїв терагерцового діапазону, а саме: для транспортних мереж мобільного зв'язку четвер-

того (4G) та п'ятого (5G) поколінь, для безпроводових систем високошвидкісної передачі відеосигналів високої (HDTV) та надвисокої (UHDTV) чіткості, для побудови надвисокошвидкісних радіорелейних систем прямої видимості, для високоточного виявлення та розпізнавання малорозмірних рухомих цілей і для сенсорів з метою отримання більш точної та детальної оперативної інформації про стан контрольованого об'єкта або місцевості. Також останні десятиріччя терагерцові технології знаходять своє місце й в медицині.

В технологіях стільникового зв'язку LTE (4G, 5G) задля забезпечення високих швидкостей передачі інформації до та від абонента потрібна величезна смуга частот як абонентських радіоканалів, так і каналів транспортної мережі, що є одним з головних факторів, який обмежує поширення даних технологій. Одним з рішень для побудови транспортних мереж мобільного зв'язку 4G та 5G є використання телекомунікаційних систем фіксованого радіозв'язку терагерцового діапазону та перехід на малі стільники (мікростільники, піко- і фемтостільники), які являють собою базові станції з обмеженим радіусом дії і які встановлюються для розширення зони покриття базових станцій макрорівня. Маючи невелику дальність передачі, ці малі стільники дозволять задіяти технології багаторазового використання частот для більш ефективного використання доступного спектру. Системи малих стільників з часом можуть стати основою стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Малі стільники теоретично можуть працювати в терагерцовому діапазоні, що дозволить отримати безцінний спектр, необхідний для розширення зони покриття та надання сучасних високошвидкісних телекомунікаційних сервісів [1-9].

В 2015-2016 році в НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» на базі Науково-дослідного інституту телекомунікацій у кооперації з Інститутом електроніки та зв'язку Української Академії Наук за рахунок видатків державного бюджету була виконана науково-дослідна робота №2846п «Розробка радіолінії із гігабітною пропускнуою здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу» (номер держ. реєстрації 0115U002330). В результаті виконання вказаної науково-дослідної роботи на базі сучасних досягнень в мікроелектроніці розроблено схематичне рішення з побудови радіорелейної системи терагерцового діапазону, проведено імітаційне моделювання основних функціональних вузлів її приймальнопередавального тракту, спроектовано та виготовлено дослідний зразок прийомопередавача цифрової симплексної радіорелейної лінії терагерцового діапазону частот 130–132 ГГц [10].

Для дослідження працездатності вищевказаного прийомопередавача було розроблено перетворювач частоти, що дозволив виконати перенесення сигналу стандарту цифрового супутникового телебачення стандарту DVB-S, що має символічну швидкість 27,5 Мсимв/с та ширину спектра $\Delta f = 36$ МГц з проміжною частотою $f_{пч1} = 70$ МГц на проміжну частоту $f_{пч2} = 1960$ МГц й передати його через прийомопередавач терагерцового діапазону, вимірявши при цьому зміну параметрів сигналу DVB-S.

Метою даної роботи є розгляд результатів імітаційного моделювання та експериментальних досліджень з передавання сигналу стандарту DVB-S через дослідний

зразок прийомопередавача терагерцового діапазону при використанні розробленого перетворювача частоти. Головний науковий результат роботи, отриманий авторами, полягає в тому, що за допомогою розробленого перетворювача частоти вперше в Україні вдалось довести можливість надійного передавання сигналів з цифровою модуляцією (в даному випадку на прикладі сигналу стандарту DVB-S) по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону в умовах впливу на нього фазового шуму гетеродину прийомопередавача, а також лінійних та нелінійних спотворень цього тракту.

Основна частина

Розроблена імітаційна модель перетворювача частоти (рис. 1) для прийомопередавача ТГц діапазону складається з кільцевого діодного змішувача (рис. 2) MIXER_B, ВЧ генератору TONE, смугового фільтру LIN_S та високочастотних підсилювачів AMP_B (рис. 1). Моделювання перетворювача частоти було виконане в програмному середовищі Microwave Office для наступних його параметрів:

1. Частота вхідного сигналу $f_{ПЧ1} = 70$ МГц;
2. Частота гетеродинного входу $f_{гет} = 1890$ МГц;
3. Потужність вхідного сигналу $P_{вх} = -40 \dots -10$ дБм;
4. Потужність гетеродину $P_{гет} = -10 \dots 13$ дБм;
5. Придушення завади дзеркального каналу 1820 МГц $D_{дзерк} \geq 40$ дБ;
6. Придушення частоти гетеродину 1890 МГц, $D_{гет} \geq 40$ дБ;
7. Вихідна проміжна частота $f_{ПЧ2} = 1960$ МГц;
8. Розв'язка між входом гетеродину та входом сигналу не менше 20 дБ;
9. Розв'язка між входом сигналу і входом гетеродину не менше 15 дБ;
10. Розв'язка між виходом проміжної частоти і сигнальним входом не менше 30 дБ;
11. Розв'язка між виходом проміжної частоти і входом гетеродину не менше 30 дБ.

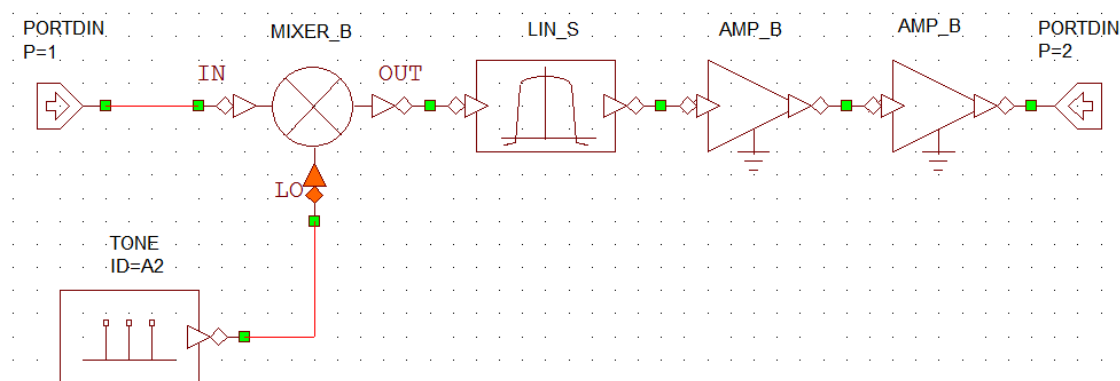


Рис. 1. Імітаційна модель перетворювача частоти у складі змішувача, гетеродину, смугового фільтру, підсилювача, дільника потужності

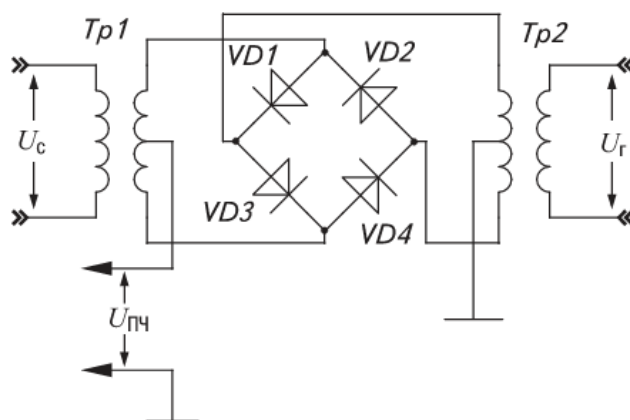


Рис. 2. Електрична схема кільцевого діодного змішувача

На рис. 3 зображено спектр сигналів на виході кільцевого діодного змішувача імітаційної моделі на рис.1. при перетворенні частоти «вгору».

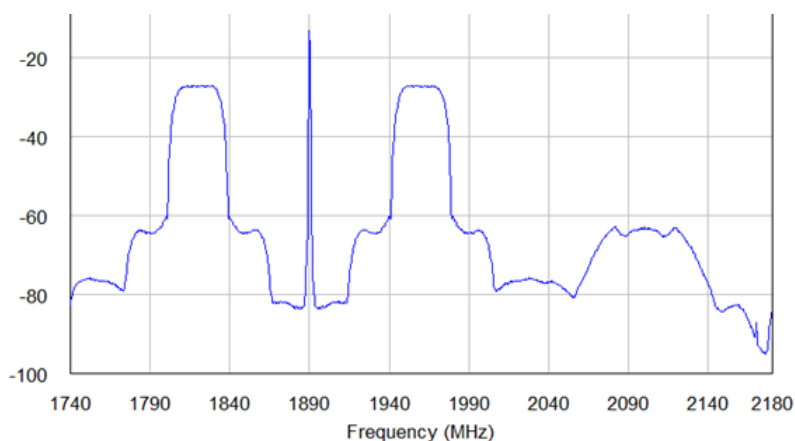


Рис. 3. Спектри сигналів на виході кільцевого діодного змішувача

В якості імітаційної моделі смугопропускнуго фільтру обрано модель фільтру на зосереджених реактивних елементах (рис. 4) з АЧХ Батерворта (рис. 5), що був синтезований за допомогою утиліти iFilter, яка входить до складу САПР Microwave Office. Смуга пропускання цього фільтру складає 50 МГц, а втрати в смузі пропускання – біля 6 дБ. При цьому на виході фільтру придушення потужності гетеродину $f_{\text{гет}} = 1890$ МГц складає біля 60 дБ, а дзеркального каналу з частотою $f_{\text{дз}} = f_{\text{гет}} - f_{\text{пч1}} = 1820$ МГц – не менше 80 дБ.

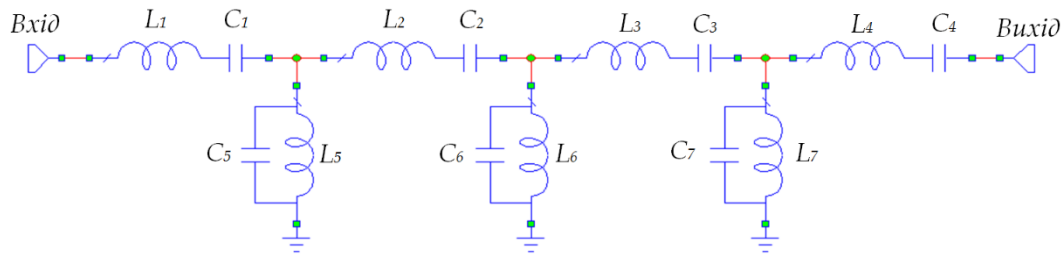


Рис. 4. Модель смугопропускнуго фільтру на зосереджених елементах

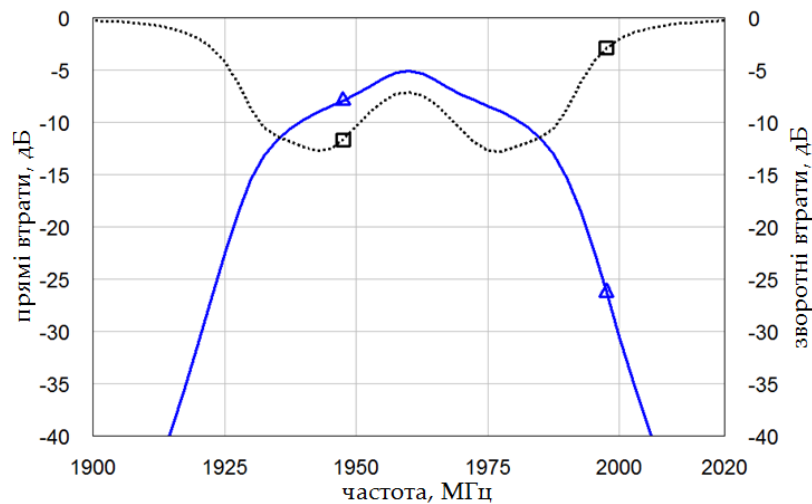


Рис. 5. АЧХ фільтру з центральною частотою 1.96 ГГц

Після смугопропускнуго фільтру додано два підсилювачі з коефіцієнтом підсилення по 12 дБ кожен та ділянку потужності з втратами 3 дБ. Остаточний відфільтрований DVB-S сигнал на виході імітаційної моделі перетворювача частоти зображено на рис. 6.

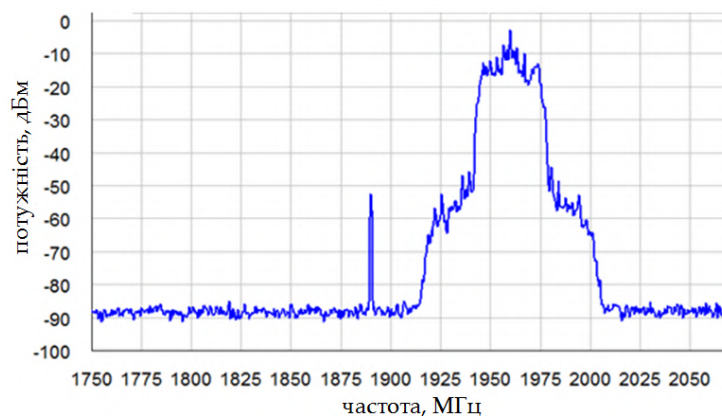


Рис. 6 Спектр сигналу DVB-S частотою 1,96 ГГц на виході фільтру

Структурна схема розробленого перетворювача частоти для прийомопередавача терагерцового діапазону показано на рис. 7.

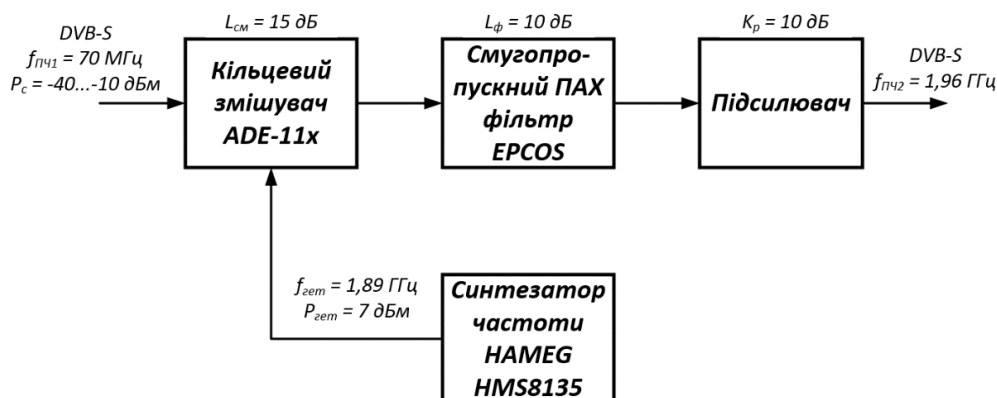


Рис. 7. Структурна схема розробленого перетворювача частоти

В якості змішувача частоти було використано ІМС широкосмугового кільцевого діодного змішувача ADE-11x фірми Mini-Circuits, що працює в діапазоні 10 – 2000 МГц, а в якості гетеродину – синтезатор частоти HAMEG HMS8135. Смугопропускний фільтр був реалізований на базі двох ІМС фільтру на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) фірми EPCOS з центральною частотою 1960 МГц, а підсилювач частоти на базі ІМС AG602 фірми TriQuint.

На рис. 8 показано місце перетворювача частоти в складі лабораторної установки для дослідження працездатності дослідного зразка передавача та приймача терагерцового діапазону зі складу прийомопередавача терагерцового діапазону, що сполучені між собою хвилеводною лінією з прямокутним перерізом 1,6x0,8 мм². При цьому в якості джерела сигналу DVB-S виступав модулятор DVB-3030 Radyne Comstream, на вхід якого в свою чергу поступав транспортний потік від професійного приймача супутникового телебачення IRD-2600 CODICO SCOPUS. В якості вимірювача параметрів ТВ сигналів виступав прилад ST-2 ROVER.

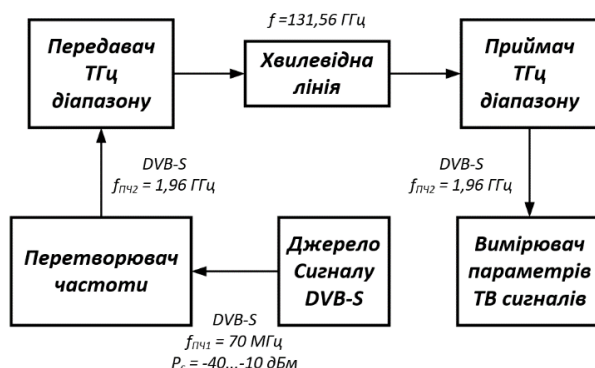


Рис. 8. Структурна схема для дослідження працездатності прийомопередавача ТГц діапазону за допомогою перетворювача частоти

Відповідно до рис. 9, до складу прийомопередавача терагерцового діапазону входять: 1) гетеродин у складі прецизійного кварцевого генератору з частотою 100 МГц, помножувачі частоти та дільник потужності; 2) передавач та приймач у складі подвоювача частоти гетеродину, субгармонійного діодного змішувача, смугопропускного фільтру та підсилювача проміжної частоти. При цьому діапазон проміжних частот по входу передавача та виходу приймача складає від 1 до 2 ГГц.

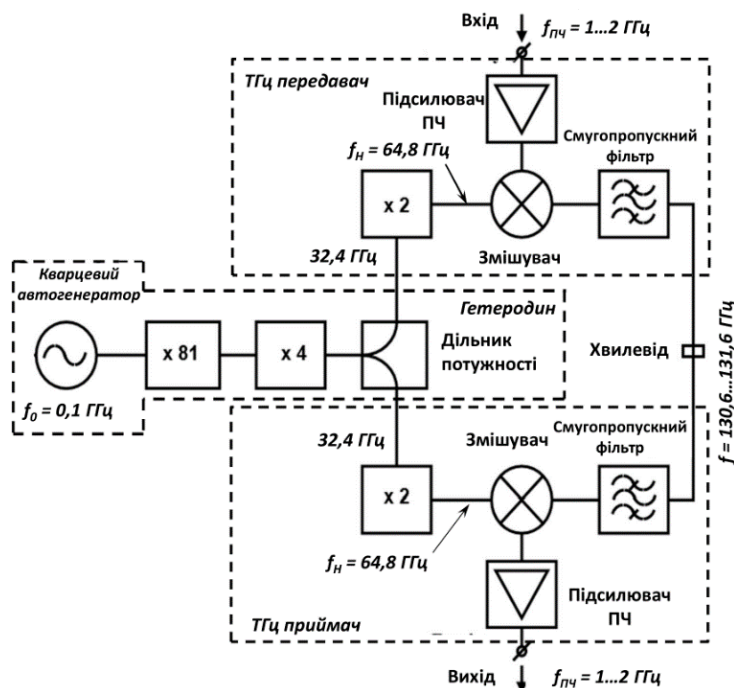


Рис. 9. Структурна схема дослідного зразка прийомопередавача ТГц діапазону

На рис. 10 зображено спектр сигналу на виході кільцевого змішувача ADE-11x перетворювача частоти, а на рис. 11 та рис. 12 відповідно спектр сигналу DVB-S на виході смугопропускного фільтру в масштабі 70 МГц/поділку та 5 МГц/поділку.

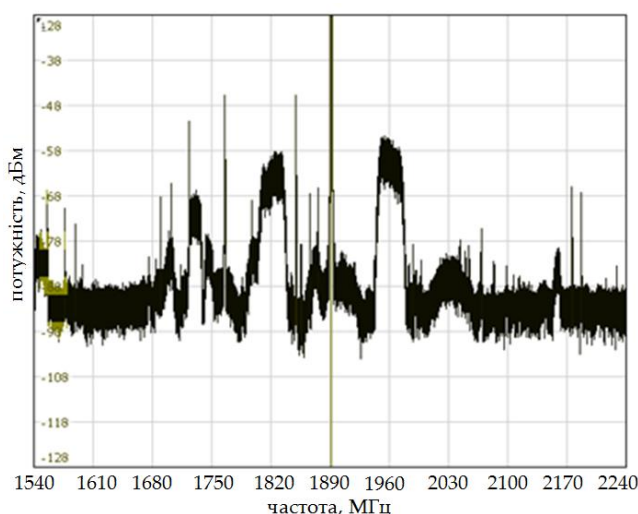


Рис. 10. Результати дослідження спектру сигналу DVB-S на частоті 1,96 ГГц до проходження смугового ПАХ фільтру

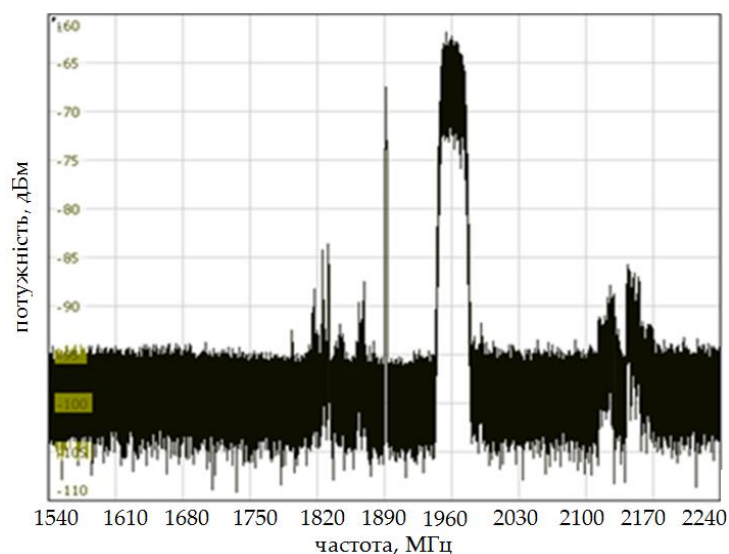


Рис. 11. Результати дослідження спектру сигналу DVB-S на частоті 1.96 ГГц після проходження смугового ПАХ фільтру

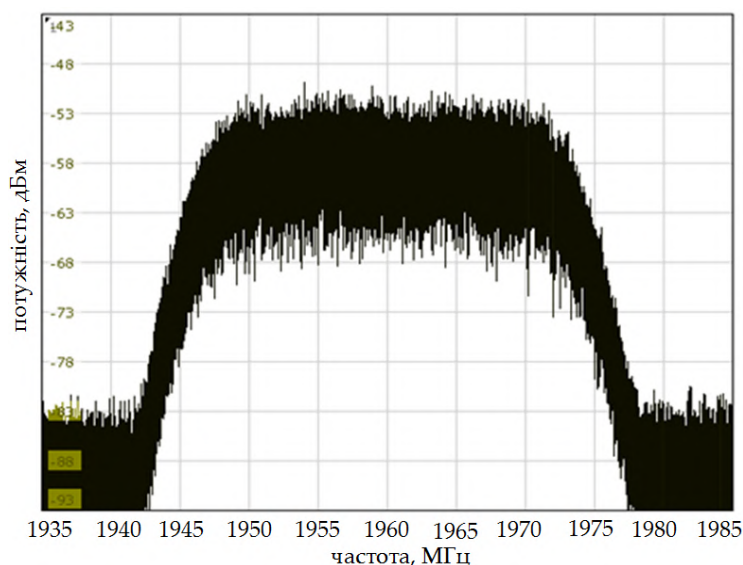


Рис. 12. Результати дослідження спектру сигналу DVB-S на частоті 1,96 ГГц на виході приймача терагерцового діапазону

Як видно з порівняння рис. 10 та рис. 11, придушення дзеркального каналу на частоті 1820 МГц та коливання гетеродину на частоті 1890 МГц складає не менше 40 дБ.

Основні параметри сигналу стандарту DVB-S, перенесеного за допомогою змішувача на частоту 1960 МГц, які виміряні в різних ланках схеми на рис. 8 з використанням ST-2 ROVER, зведені до табл. 1.

Таблиця 1. Параметри сигналу DVB-S з частотою 1.96 ГГц

На виході	N.MAR, дБм	MER, дБм	EVM, %	bBER	aBER	PWR, дБм
змішувача частоти	11	17,4	14	10^{-6}	$<10^{-8}$	-25,2
смугопрпусного ПАХ фільтра	9,5	15,9	17	10^{-6}	$<10^{-8}$	-43,9
адаптера живлення підсилювача	10,9	16,8	14	$2 \cdot 10^{-6}$	$<10^{-8}$	-21,4
спрямованого відга- лужувача передавача ТГц діапазону	10,7	16,5	15	10^{-6}	$<10^{-8}$	-24,7
приймача ТГц діапазону	8,3	14,6	19	$2 \cdot 10^{-6}$	$<10^{-8}$	-40,9

Аналіз отриманих результатів показав, що дослідний зразок прийомопередавача терагерцового діапазону здатен передавати та приймати сигнал DVB-S з деякими спотвореннями, що чисельно виражаються у зменшенні параметру запасу завадостійкості N.MARG з 10,7 дБ на вході передавача до 8,3 дБ на виході приймача, що можна вважати непоганим результатом.

В свою чергу, в роботі [11] відображено результати успішних випробувань з передавання групового сигналу стандартів DVB-S/S2 (рис. 13), сформованому на виході конвертору приймальної антени системи супутникового телебачення, через дослідний зразок прийомопередавача терагерцового діапазону.

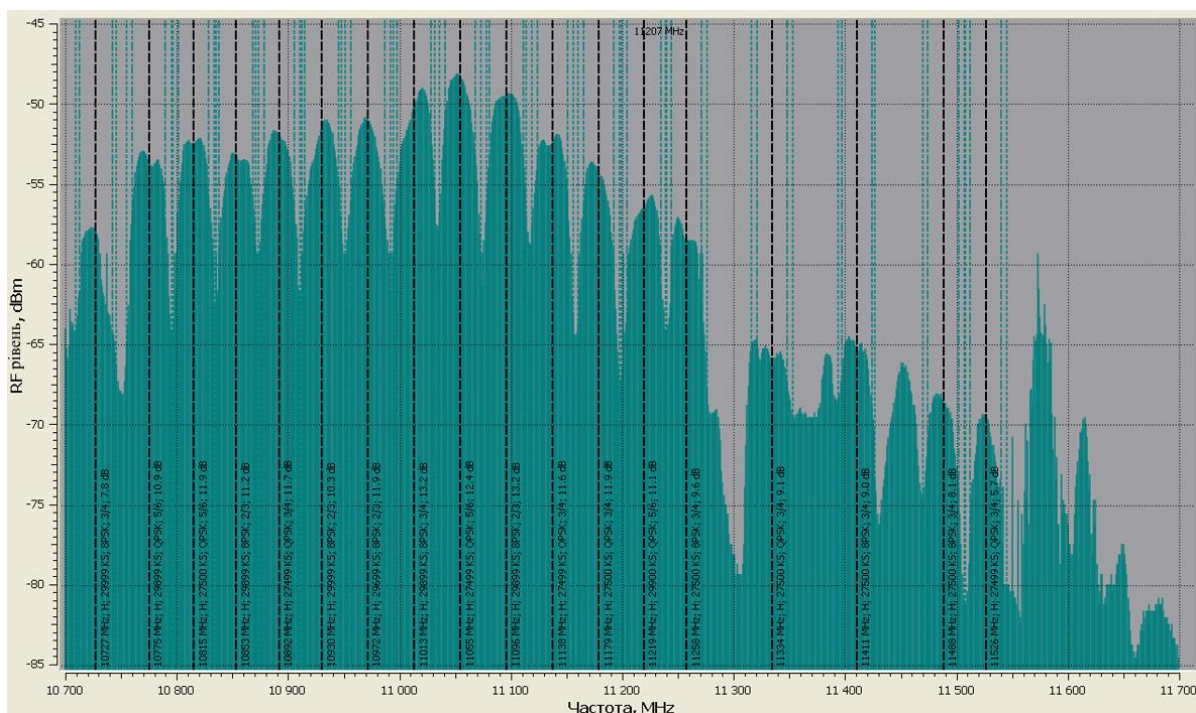


Рис. 13. Груповий сигнал стандартів DVB-S/S2 від супутника Hot Bird (13E), що передався через прийомопередавач терагерцового діапазону на виході приймача

Вказаний груповий сигнал на виході супутникового конвертору мав смугу проміжних частот 0,977 – 1,95 ГГц та складався з 22-х сигналів з швидкістю $V = 27,5$ Мсимв/с, з яких половина передається у стандарті DVB-S, а інша половина у стандарті DVB-S2. Загальна швидкість передачі групового сигналу складала біля 1,3 Гбіт/с. Успішність передавання через прийомопередавач терагерцового діапазону групового сигналу з широкою смугою частот (майже 1 ГГц) з одного боку підтверджує його працездатність, а з іншого – закладає основи для дослідження можливості передавання в терагерцовому діапазоні надшикоросмугових імпульсних сигналів (UWB) з подальшою оцінкою спотворень таких сигналів в часовій області.

Варто також відзначити, що результати теоретичних розрахунків, представлені в роботі [12], показують, що досліdnий зразок прийомопередавача здатний забезпечувати передачу сигналу із загальною пропускну здатністю каналу зв'язку до 1,2 Гбіт/с при значенні ймовірних бітових помилок BER на рівні 10^{-6} з теоретичною дальністю зв'язку в межах 1 км без використання підсилювача потужності в передавачі та малошумливого підсилювача в приймачі терагерцового діапазону.

Висновки

Розроблений перетворювач частоти сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-S дозволив авторам роботи отримати головний науковий результат – він допоміг підтвердити факт працездатності всіх вузлів досліdnого зразка прийомопередавача терагерцового діапазону при передаванні через нього сигналу стандарту DVB-S з цифровою модуляцією та створив можливість для вимірювання зміни основних параметрів сигналу DVB-S при його передаванні через вказаний прийомопередавач, на основі яких можна говорити про малий рівень спотворень та шумів, що діють на сигнал в цьому прийомопередавачі.

Вказана розробка прийомопередавача телекомунікаційної системи фіксованого зв'язку терагерцового діапазону для України є новітньою, оскільки на даний час в Україні є розробки тільки окремих напівпровідникових елементів та пристроїв, здатних працювати в довгохвильовій частині цього діапазону. Завершених розробок телекомунікаційних систем для передачі високошвидкісних даних в терагерцовому діапазоні, які знаходяться в комерційній експлуатації, поки що немає.

Використання телекомунікаційних систем фіксованого радіозв'язку терагерцового діапазону та перехід на малі стільники (мікростільники, піко- та фемтостільники) є одним з ефективних рішень для побудови транспортних мереж мобільного зв'язку наступних поколінь. Отже час не стоїть на місці і розвиток безпроводових телекомунікаційних систем продовжується, маючи головною тенденцією перехід в більш високочастотні діапазони радіохвиль, в першу чергу в міліметровий та терагерцовий, в яких є можливість задовольнити необхідний клієнтський попит на пропускну здатність в мережах стільникового мобільного зв'язку 4G та 5G. При цьому варто відзначити, що завдяки науково-технічним здобуткам в галузі мікроелектроніки, що були досягнуті в світі в останні десять років в першу чергу в області розробки

напівпровідникових пристроїв (підсилювачі, змішувачі, синтезатори частот, фільтри) міліметрового та терагерцового діапазону, за останні п'ять років на телекомунікаційному ринку світу з'явилася значна кількість виробників радіорелейного обладнання міліметрового діапазону, яке при комерційній експлуатації забезпечує пропускну здатність радіоствола з шириною смуги радіочастот 250 МГц при модуляції 256-QAM до 2,6 Гбіт/с [13] при дальності дії радіосистеми біля 5 км. Отже можна з певністю стверджувати, що поява радіорелейного обладнання терагерцового діапазону з гігабітними пропусковими здатностями вже не за горами.

На базі розроблених вітчизняними вченими технічних рішень представляється доцільним і перспективним в подальшому дослідження можливості створення системи радіозв'язку терагерцового діапазону частот на основі імпульсних надшироко-смужових сигналів, що забезпечить необхідну якість надвисокошвидкісного терагерцового каналу передачі при оптимальних значеннях енергетичного ресурсу лінії радіозв'язку, а також практичну відсутність можливості виявлення і несанкціонованого доступу до інформації, що передається.

Список літератури:

1. Новости ВПК: РТИ ведет принципиально новые разработки в области обработки информации [Электронный ресурс] – 2014г. – Режим доступа http://vpk.name/news/118789_rti_vedet_principialno_novyie_razrabotki_v_oblasti_obrabotki_informacii.html.
2. Frenzel L. Миллиметровые волны раздвинут границы будущего беспроводных технологий. Часть 1. – 2014. – Вып. 24. – С. 25-29.
3. Frenzel L. Подавление низкочастотных помех в системах автоматического управления. Часть 2. – 2014. – Вып. 24. – С. 30-33.
4. Ilchenko M.Ye, Narytnik T.N., Fisun A.I., Belous O.I. Terahertz range telecommunication systems // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011.– Vol. 70, Issue 16. – P.1477-1487.
5. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь.– 2011. – №3. – С. 205-210.
6. Нарытник Т.Н., Домрачева Е.А., Казимиренко В.Я. Анализ эффективности использования миллиметрового диапазона электромагнитных волн для передачи данных // Матеріали Восьмої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій». – К.: НТУУ«КПІ», 2014. – С. 134-136.
7. Ильченко М.Ю. Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи широкосмужового радіодоступу. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.
8. Генко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКИО», 2009. – 672 с.
9. Ericsson Mobility Report [Electronic resource] – November 2016p. – Access mode: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2016/ericsson-mobility-report-november-2016.pdf>.
10. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В. Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – 2016. – №2. – С. 42-49.

11. Наритник Т.М., Авдеєнко Г.Л., Набока Б.Ю. Дослідження багатоканальних сигналів цифрового телебачення DVB-S при їх передаванні по приймально-передавальному тракту терагерцового діапазону // Цифрові технології. – 2016. – № 19. – С. 26-33.

12. Наритник Т.Н., Набока Б.Ю., Авдеєнко Г.Л. Дослідження передавання радіосигналу цифрового телебачення стандарту DVB-S з використанням радіоканалу терагерцового діапазону // Матеріали десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій». – К.:НТУУ «КПІ», 2016. – С.134-136.

13. Ватсон-Телеком: ALCOMA AL80GE [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://watson-telecom.ru/radiodostup/ppc/alcoma-al80ge.html>.

УДК 621.396.43

АНАЛІЗ ТЕРАГЕРЦОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ РОЗРОБОК



[Т.М. НАРИТНИК](#)

СП «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук»



[А.В. ЄРМАКОВ](#), [С.О. БОНДАРЧУК](#), [Д.С. ВАЛЬЧУК](#)

Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»

Abstract – Terahertz frequency band (THz) lies between millimeter and infrared wavelengths bands. According to the ITU recommendations THz band has a range of 300 GHz to 3 THz (range of wavelengths from 1 to 0.1 mm). However, in the scientific interpretation, this range occupies an area of frequency from 100 GHz to 3 THz and has significant advantages in comparison with other bands. First, it is worth highlighting the possibility of telecommunication systems capacity increasing. Secondly, it is a narrow antenna beam pattern, which allows for the placement of a large number of stations without the interference between them. However, there are certain problems in the research of this range, namely: the generation, reception and processing techniques of these signals have some differences from the usual methods when working with traditional frequency ranges such as VHF, UHF. In addition, an essential problem is the lack of theoretical basis compared to microwave systems. Therefore, the development of the terahertz band relies on the ability to generate process and detect the signal by radio electronic devices in this band. This article describes already existed terahertz range telecommunication systems, advantages and opportunities that the terahertz technology brings for telecommunication systems have been shown. The experimental results of Ukrainian scientists in this field have been reviewed. The main developments of the terahertz range electronic devices and their list of products have been analyzed and reviewed.

Анотація – В даній статті розглянуті телекомунікаційні системи терагерцового діапазону, показані переваги та можливості, яких можна досягнути із використанням терагерцової технології. Також розглянуті експериментальні результати українських науковців у даній галузі, основних виробників радіоелектронних пристроїв та список їх продукції, що працює у терагерцовому діапазоні.

Аннотация – В данной статье рассмотрены телекоммуникационные системы терагерцового диапазона, показаны преимущества и возможности, которых можно достичь с использованием терагерцовой технологии. Также рассмотрены экспериментальными результаты украинских ученых в данной области, основных производителей радиоэлектронных устройств и список их продукции, функционирующей в терагерцовом диапазоне.

Вступ

Терагерцовий діапазон частот (ТГЧ-діапазон) лежить в межах від міліметрових довжин хвиль до інфрачервоного діапазону. Згідно з рекомендаціями міжнародного союзу електрозв'язку ТГЧ-діапазон має межі від 300 ГГц до 3 ТГц (діапазон довжин хвиль від 1 до 0,1 мм). Проте в найбільш широкій інтерпретації цей діапазон займає

область частот від 100 ГГц до 3 ТГц. Терагерцовий діапазон має свої значні переваги, що і привертає увагу багатьох науковців. Перш за все, варто виділити можливість значного збільшення пропускної здатності телекомунікаційних систем, які працюють в цьому діапазоні. Також терагерцове випромінювання в ході проведення досліджень показало компенсацію значних недоліків при прийомі інформації як в інфрачервоному, так і мікрохвильовому діапазоні. Перш за все, це вузько спрямованість променя, що дозволяє розміщати велику кількість станцій без взаємної інтерференції між ними [1]. Проте виникають певні проблеми при дослідженні даного діапазону, а саме: техніка генерації, прийому та обробки даних сигналів мають деякі відмінності від звичних методів при роботі з освоєними діапазонами частот. Суттєвою проблемою є відсутність великої теоретичної бази в порівнянні з мікрохвильовим чи інфрачервоним випромінюванням. Тому розвиток і освоєння ТГЧ-діапазону спирається на можливості радіоелектронних пристроїв для генерації, обробки та детектування сигналу.

I. Аналіз застосування терагерцових технологій для створення інноваційних розробок

Терагерцовий діапазон частот завдяки своїм особливостям, може використовуватись в різних областях: фізики, хімії, біології, медицини, безпеки.

Сфери використання терагерцових хвиль:

1) телекомунікаційні системи

- в транспортних мережах мобільного зв'язку наступних поколінь;
- в телерадіомовленні;
- в міжсупутниковому зв'язку;
- в радарях та в радіолокації ближньої дії;
- в радіорелейних системах прямої видимості;
- в комунікаціях однієї будівлі, зокрема, в безпроводовій версії USB 3.0.

2) системи виявлення та розпізнавання об'єктів

3) системи контролю якості харчових продуктів

4) системи діагностики в медицині

5) системи для сканування об'єктів

6) системи як інструмент для наукових досліджень (радіоастрономічні спостереження з супутників холодних космічних об'єктів, високоточний хімічний аналіз атмосфери, вивчення надпровідності, створення нових напівпровідникових матеріалів, біомолекулярні дослідження).

Як відомо, вчені приступили до розробки 5G. Про плюси впровадження мереж п'ятого покоління ще рано говорити, але можна виділити такі вимоги та цілі при впровадженні даних мереж зв'язку:

- стабільний зв'язок, з великою зоною покриття;
- підтримка попередніх поколінь;
- зменшення енергоспоживання;

- пропускна здатність мережі понад 10 Гбіт/сек;
- підтримка одночасного підключення до 100 млн. пристроїв/км²;
- затримка передачі даних на радіоінтерфейсі не більше 1 мс.

Одним із ймовірних рішень для дотримання сформульованих вище вимог, насамперед збільшення пропускної здатності, може бути застосування терагерцового діапазону. Дане рішення дозволить також вирішити проблему дефіциту частотного спектру.

Іншим прикладом доцільного використання терагерцової технології може бути її використання у стратосферних системах зв'язку. Дана концепція використання стратосферних систем зв'язку останнім часом привертає все більше й більше уваги. Принцип роботи стратосферних систем зв'язку полягає в тому, щоб розмістити приймально-передавальне обладнання (по суті – базові станції) на безпілотних стратосферних платформах. В якості таких платформ можуть використовуватися повітряні кулі, дрони, дирижаблі і та ін., які повинні летіти на висоті 18-25 км, що не заважає цивільній авіації (рис. 1) [2]. На таких висотах швидкість вітру є досить низькою, а густина повітря є в рази нижчою, ніж в приземному шарі. Використання стратосферних систем зв'язку дає свої значні переваги, основною з яких є підвищений кут огляду, що забезпечується стратосферною платформою порівняно із наземним відповідником.

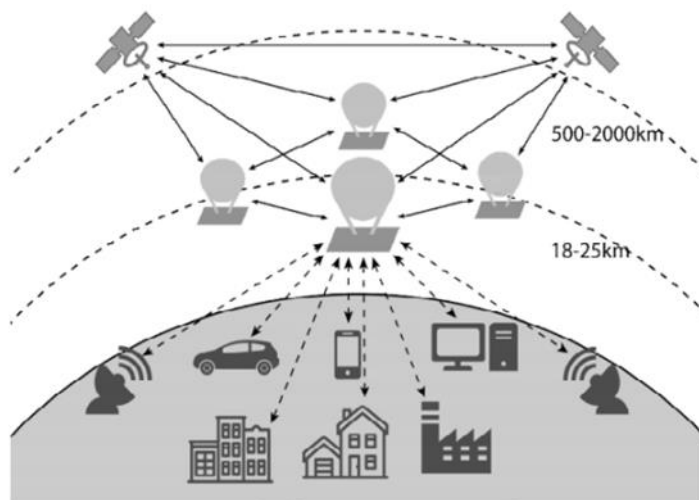


Рис. 1. Схема стратосферної телекомунікаційної системи

Для забезпечення зв'язку із стратосферною станцією доцільно використовувати системи терагерцового діапазону, оскільки це дає ряд значних переваг, а саме [3]:

- слабка завантаженість даного діапазону;
- можливість виділення широких смуг частот (до 5 ГГц і більше);
- спрощена процедура виділення частот у багатьох країнах світу;
- істотне зниження габаритів антенних систем, які забезпечують при цьому формування вузької діаграми спрямованості.

Широке впровадження стратосферних телекомунікаційних систем зв'язку дає дуже великі можливості у застосуванні: для забезпечення зв'язку в мережах загального користування, для оперативного зв'язку у військових цілях, для забезпечення зв'язку у зонах, що постраждали від стихійного лиха.

Для ефективної роботи систем зв'язку необхідні прилади орієнтовані на роботу в терагерцовому діапазоні. В Україні застосування терагерцової технології в телекомунікаційних системах привертає з кожним роком більше й більше уваги. Уже зараз проводяться дослідження та створення реальних прототипів робочих телекомунікаційних систем терагерцового діапазону. Особливий пріоритет має питання використання терагерцового діапазону у системах передачі даних та доступу до інформаційних ресурсів, зокрема, доступу до Інтернету в мобільних мережах зв'язку. Державним університетом телекомунікацій та Інститутом електроніки та зв'язку Української академії наук проводяться найбільш активні дослідження зі створення різноманітних пристроїв та повноцінних систем орієнтованих на роботу в терагерцовому діапазоні. В Інституті електроніки та зв'язку розробляються концепції створення радіорелейних та Wi-Fi систем терагерцового діапазону. Наприклад, уже спроектований передавальний та приймальний тракт радіорелейних систем терагерцового діапазону. Також проведено дослідження лабораторного зразка цифрової симплексної радіорелейної системи терагерцового діапазону і цифрового модему з пропускнуою каналною здатністю до 1200 Мбіт/с на дальність зв'язку в нормальних умовах в межах 1 км при ймовірних бітових помилки BER не більше 10^{-6} [4]. Українськими науковими дослідниками представлено аналітичний огляд теоретичних і експериментальних досліджень і розробок телекомунікаційних систем в суб- і терагерцовому діапазоні з використанням елементів, пристроїв, ідей та технологій оптики (фотоніки) і мікрохвильових технологій (електроніки). Також розглянуто перспективні дослідження в напрямку розвитку транспортних розподільних систем і створення безпроводових ліній зв'язку з шумовим носієм в субтерагерцовому діапазоні частот [5-7]. Реалізовано концепцію створення програмно-визначених радіосистем на основі технології Wi-Fi, продемонстрована на створеній гігабітній системі передачі в терагерцовому діапазоні 130-134 ГГц, яку протестовано в лабораторних умовах з досягненням швидкості до 1,2 Гбіт/с [8]. Це лише перші кроки у напрямку розвитку телекомунікаційних систем ТГЧ-діапазону, проте згодом саме ця основа дозволить розробити та впровадити пристрої та системи для широкого застосування.

II. Аналіз розробок радіоелектронних пристроїв телекомунікаційних систем терагерцового діапазону

Розглянемо структурну схему радіотракту радіорелейної лінії зв'язку, що працює у терагерцовому діапазоні (рис. 2). До складу даної лінії входять: генератор імпульсного надширокополосного радіосигналу (IR-UWB), передавач терагерцового діапазону, радіоканал, приймач терагерцового діапазону та приймач IR-UWB сигналу. Одним із

базових елементів і передавача, і приймача терагерцового діапазону є підсилювач потужності.

Розглянемо приклади наявних підсилювачів потужності, що працюють в терагерцовому діапазоні (рис.3). Підсилювачі потужності MGA2101 від організації Northrop Grumman та високопродуктивний підсилювач 955 серії від Millimeter WaveProducts забезпечують підсилення близько 20 дБ в діапазоні 300-340 ГГц та 15 дБ в діапазоні 90-140 ГГц відповідно [9, 10].

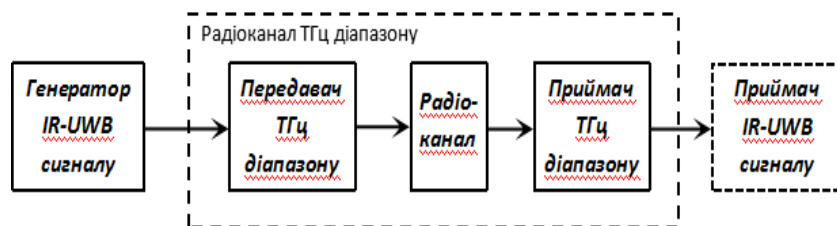


Рис. 2. Структурна схема радіотракту радіорелейної лінії зв'язку терагерцового діапазону

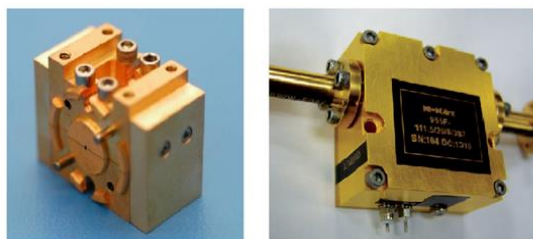


Рис. 3. Фото підсилювачів потужності терагерцового діапазону

Розглянемо приклади малощумних підсилювачів (рис. 4). Малощумний підсилювач від Northrop Grumman MLA1101 забезпечую підсилення 16 дБ в діапазоні 130-140 ГГц [9]. Організацією Millitech виготовлено цілу серію малощумних підсилювачів, які орієнтовані на роботу в діапазонах від 19 до 130 ГГц [11].

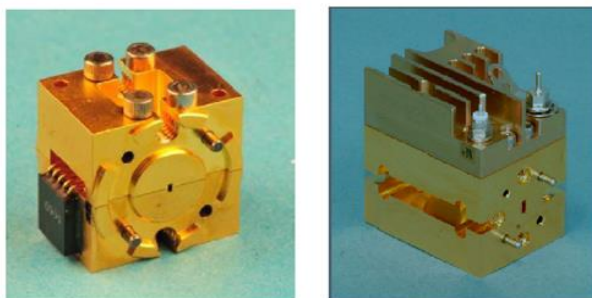


Рис. 4. Фото малощумних підсилювачів ТГц діапазону

Розглянемо приклади антен, балансних змішувачів, фільтрів та генераторів, які пристосовані до роботи в телекомунікаційних системах терагерцового діапазону та виготовлені Millitech [11].

У продаж уже поступила ціла серія оптичних лінзових антен із діаметром від 7 до 15 сантиметрів, кутром випромінювання до 10 градусів та коефіцієнтом підсилення до 50 дБ. Також існує серія балансних змішувачів, орієнтовані на роботу в діапазонах 75-110 ГГц та 90-140 ГГц. Дані змішувачі можуть працювати із відносно низькопотужними гетеродинами, в загальному 13-15 дБм за рахунок використання GaAs діодів із бар'єром Шоттки. Генератори, виготовлені даною організацією, дозволяють добитись потужності близько 15 дБм в діапазоні до 100 ГГц. Millitech та виготовляють високоселективні фільтри нижніх частот, полосопропускні та фільтри високих частот, орієнтовані на терагерцовий діапазон частот. Для прикладу розглянемо полосопропускний фільтр FIB-05 із смугою пропускання 140-220 ГГц та затуханням близько 50 дБ на верхній та нижній межах загородження частот.

Отже, уже зараз ведеться інтенсивна робота зі створення різноманітних радіоелектронних пристроїв телекомунікаційних систем терагерцового діапазону і, можливо, зовсім скоро терагерцова технологія стане основою для більшості транспортних розподільчих телекомунікаційних мереж.

Висновки

Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону мають величезний потенціал. З кожним роком теоретична та практична база з цього питання все збільшується і збільшується, а це в свою чергу відкриває нові можливості у генерації, обробці та прийомі сигналів в ТГЧ-діапазоні. Переваги застосування терагерцового діапазону перевершують недоліки і відкривають великі можливості у застосуванні в області телекомунікацій. Одним із перспективних варіантів впровадження терагерцових технологій є можливе використання їх на стратосферних платформах. Можливо саме дана система зв'язку стане основою при проектуванні та впровадженні мобільних систем зв'язку п'ятого покоління (5G).

В подальшому для ефективного освоєння терагерцових частот необхідна обґрунтована база. Проте на даний момент ця суттєва проблема залишається невирішеною. Крім цього процес створення систем терагерцового діапазону, залишається досить затратним за рахунок складності розробки та особливостей їх функціонування.

Список літератури:

1. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С.205-210.
2. Дружинін В.А., Кременецька Я.А., Жукова О.Р. Можливості розширення зони обслуговування та радіочастотного ресурсу в стратосферних системах зв'язку // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. – №2. – С. 23-26.

3. Наритник Т. М., Казіміренко В.Я., Коритова О.А., Набока Б.Ю., Сайко В.Г. Дослідження використання терагерцового діапазону для створення мережі безпроводового ширококутового доступу // Матеріали п'ятнадцятої Міжнародної науково-технічної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВООТТП-2015), 10-14 вересня 2015р. – Одеса: ОНАЗ. – С. 16-18.
4. Ильченко М.Е., Наритник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В. Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – 2016. – №2. – С. 42-49.
5. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку субтерагерцового та терагерцового діапазонів // Цифрові технології. – 2014. – Вип. 16. – С.40-59.
6. Исаев В.М., Кабанов И.Н., Комаров В.В., Мецанов В.П. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады ТУСУРа. – 2014. – №4 (34). – С. 5-21.
7. Майборода І.М., Стороженко І.П., Бабенко В.П., Кайдаш М.В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016. – № 1 (27). – С. 45-48.
8. Narytnyk T.M., Lutchak O.V., Osypchuk S.O., Uryvskyi L.O. Criteria and Algorithms for Shaping of the Signal-Code Sequences on the Basis of Wi-Fi Technology at Deployment of the Terahertz Band Telecommunication System // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – № 74 (20). – P. 1823-1839.
9. Northrop Grumman Microelectronics Products & Services [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.northropgrumman.com/BusinessVentures/Microelectronics/Pages/default.aspx>
10. Millimeter Wave Products Amplifiers [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.miww.com/millimeter-wave-products/amplifiers/>.
11. Series LNA by Millitech [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.millitech.com>.

УДК 621.396.43

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ



[М.Е. ИЛЬЧЕНКО](#), [С.В. ДЕНЬНОВЕЦКИЙ](#), [Т.Н. НАРЫТНИК](#), [А.В. ЛУТЧАК](#),
[А.В. МАЙ](#)

Национальный технический университет Украины
«КПИ имени Игоря Сикорского»

Abstract – The justification for selecting the required frequency resource in the terahertz range has been made. It is noted that above frequencies of 100 GHz, there are three local minimum of 110-150GHz, 220-310 GHz and 370-400 GHz. In the work for research and design of an integrated receiver the operating frequency band of 280-300 GHz in the terahertz range was chosen. The modeling of functional units of the integrated receiver is made, which includes the following main functional elements: balanced mixer, local oscillator and intermediate frequency amplifier. In the process of work, the simulation and calculation of the characteristics of the integral receiver was carried out with the help of software complex – Comsol Multiphysics. The basic design of the 280-300 GHz integrated receiver based on the frequency converter on a metal-dielectric waveguide (10×10 mm) consisting of a quasioptical open resonator, super-dimensional rectangular metal and metal-dielectric waveguides, and a microbalance of a balanced mixer (BM) with nonlinear elements, which allows operating frequencies bands (20 GHz or more). Scientific novelty consists in solving the problem of increasing the working range of telecommunications by specific methods and technical solutions which were offered by the authors. The proposed technical solution makes it possible to implement a wide band of operating frequencies of 20 GHz or more in the frequency converter, reduce additive parasitic coherent and incoherent oscillations of the local oscillator to 50 dB or more; needed power was 10-13 dBm of Heterodyne.

Анотація – Виконано моделювання функціональних вузлів інтегрального приймача, яке включає в себе наступні основні функціональні елементи: балансний змішувач, гетеродин і підсилювач проміжної частоти. Розроблено базову конструкцію інтегрального приймача діапазону 280-300ГГц на базі перетворювача частоти на метало діелектричному хвилеводі (10×10 мм). Наукова новизна полягає у вирішенні проблеми підвищення робочого діапазону засобів телекомунікацій шляхом запропонованих авторами конкретних методів і технічних рішень.

Аннотация – Выполнено моделирование функциональных узлов интегрального приемника, которое включает в себя следующие основные функциональные элементы: балансный смеситель, гетеродин и усилитель промежуточной частоты. Разработана базовая конструкция интегрального приемника диапазона 280-300ГГц на базе преобразователя частоты на металлодиэлектрическом волноводе (10×10мм). Научная новизна состоит в решении проблемы повышения рабочего диапазона средств телекоммуникаций путем предложенных авторами конкретных методов и технических решений.

Введение

В последнее время по мере увеличения потребности в обеспечении передачи трафика наземной мобильной связи, представленной сетями технологии IMT-2000, IMT-Advanced и в будущем технологии IMT-2020, важным становится использование фиксированной радиосвязи в транспортной сети. На сегодняшний день скорости локальных вычислительных систем достигли отметки 100 Гбит/с и 40 Гбит/с (100 Gb/s и 40 Gb/s Ethernet соответственно), а используется в частности в Украине на данный момент 10 Gb/s Ethernet. Телевидение высокой четкости требует цифровой канал 1,5 Гбит/с и 6 Гбит/с. Поэтому стандарты 10 Gb/s Ethernet и выше отлично подходят для передачи такого рода трафика. Такая тенденция ведет к необходимости создания цифровых беспроводных систем, способных напрямую соединяться с 10 Gb/s системами [1-5].

При этом приходится делать выбор между высокой скоростью передачи данных (оптоволокно) и минимальной задержкой (микроволновые соединения). Именно с терагерцовыми беспроводными технологиями можно получить минимальное запаздывание, соизмеримое со скоростью света при пропускной способности на уровне оптоволокна. Кроме того, освоение терагерцового диапазона позволит обеспечить высокопроизводительный канал связи со спутниками.

Одной из важнейших проблем освоения диапазона 0,1-3,0 ТГц все еще остается недостаточное наличие элементной базы твердотельных устройств, способных генерировать требуемые уровни мощности (единицы милливатт и более) [6-7, 10]. Перспективным направлением развития систем терагерцового диапазона является разработка и внедрение новых схемотехнических решений при построении приемопередающего и антенного оборудования, что позволит, прежде всего, снизить стоимость оборудования и обеспечить необходимые электрические и энергетические характеристики [8].

Сегодня мобилизационная точка исследований определяется использованием сверхширокополосных импульсных сигналов IR-UWB в системах радиосвязи и радиолокации, в том числе и нового способа приема, что условно назван «неэнергетическим». Цель данной работы заключается в решении проблемы повышения рабочего диапазона средств телекоммуникаций, путем предложенных авторами конкретных методов и технических решений проектирования интегрального приемника терагерцового диапазона 280-300 ГГц для последующего исследования IR-UWB и других радиосистем в терагерцовом диапазоне.

I. Выбор частоты для системы терагерцового диапазона

В работе говорится о частотах выше 100 ГГц, поэтому выбор рабочей частоты необходимо проводить в диапазоне 100 ГГц и выше. Естественно, что частоту необходимо выбрать такую, которая бы обеспечивала максимально возможную дальность действия радиосистемы. Согласно проведенного в работе [9] анализа частотного ресурса до частоты 1 ТГц (рис. 1), частоты до 20 ГГц мало затухают в окружающем пространстве, поэтому их можно использовать для радиосистем большого радиуса действия. Что касается частот близких к 100 ГГц и выше, то их можно использовать для радиосистем ближнего радиуса действия. С другой стороны, такие системы физически способны передавать быстрые цифровые потоки, что позволяет использовать их в радиосистемах нового поколения.

При анализе частот выше 100 ГГц из рис. 1 видно, что имеет место три локальных минимума в диапазоне 110-150 ГГц, 220-310 ГГц и 370-400 ГГц. Последние два характеризуются более крупной величиной погонного затухания в свободном пространстве – около 10 дБ/км, поэтому использование этого ресурса возможно только в системах персональной связи (например, системы Bluetooth).

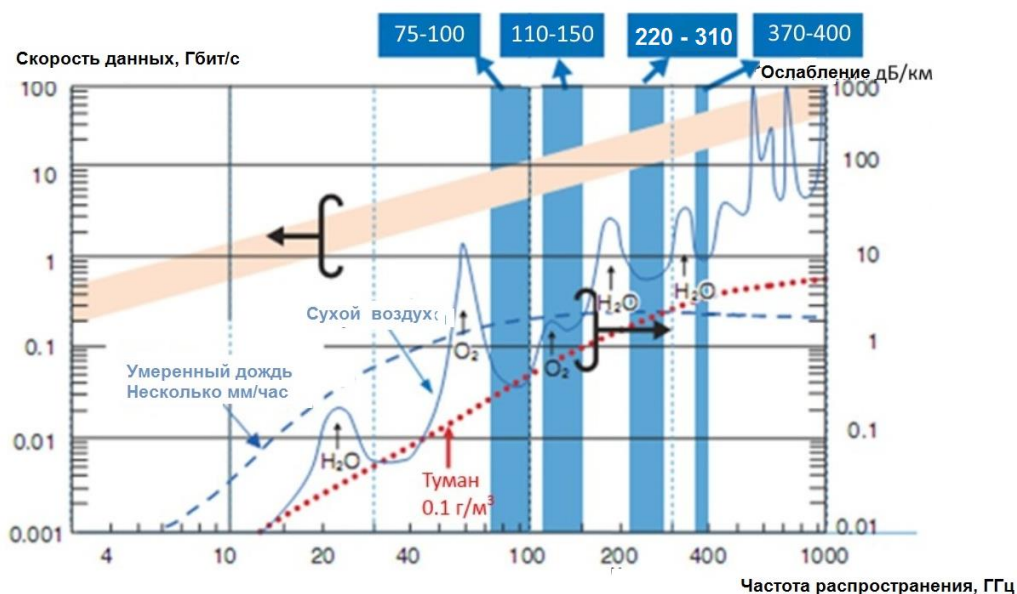


Рис. 1. Зависимость атмосферного затухания (правая шкала) и теоретически возможной пропускной способности канала (левая шкала) от частоты распространения

В системах связи на данном этапе (в условиях ограниченной мощности передатчика) могут быть использованы частоты до 400 ГГц. Однако это не означает, что другие частоты использоваться не будут. Когда мощность передатчика уже не будет проблемой, другие частоты также могут быть задействованы. Итак, выбор частоты фактически ограничивается полосой 370-400 ГГц. В работе для проектирования и исследования интегрального приемника выбрана полоса частот 280-300 ГГц в терагерцовом диапазоне.

II. Структурная схема интегрального приемника

Ключевыми элементами радиорелейной связи являются радиоэлектронные приемопередающие устройства, способные формировать и передавать модулированные сигналы необходимой скорости (от 1 Гбит/с и выше), а также принимать и обрабатывать сигналы с приемлемой высокой чувствительностью.

Структурная схема интегрального приемника (рис. 2) состоит из полосно-пропускающего фильтра (ППФ), первого балансного смесителя, гетеродина и первого усилителя промежуточной частоты (УПЧ), второго балансного смесителя и гетеродина.

Полоса пропускания по ПЧ первого смесителя составляет 25,0...45,0 ГГц, второго – 3,1...10,6 ГГц.

Таким образом, достигнута «сквозная» полоса пропускания $\Delta f=7,5$ ГГц, позволяющая использовать уже разработанное модемное оборудование.

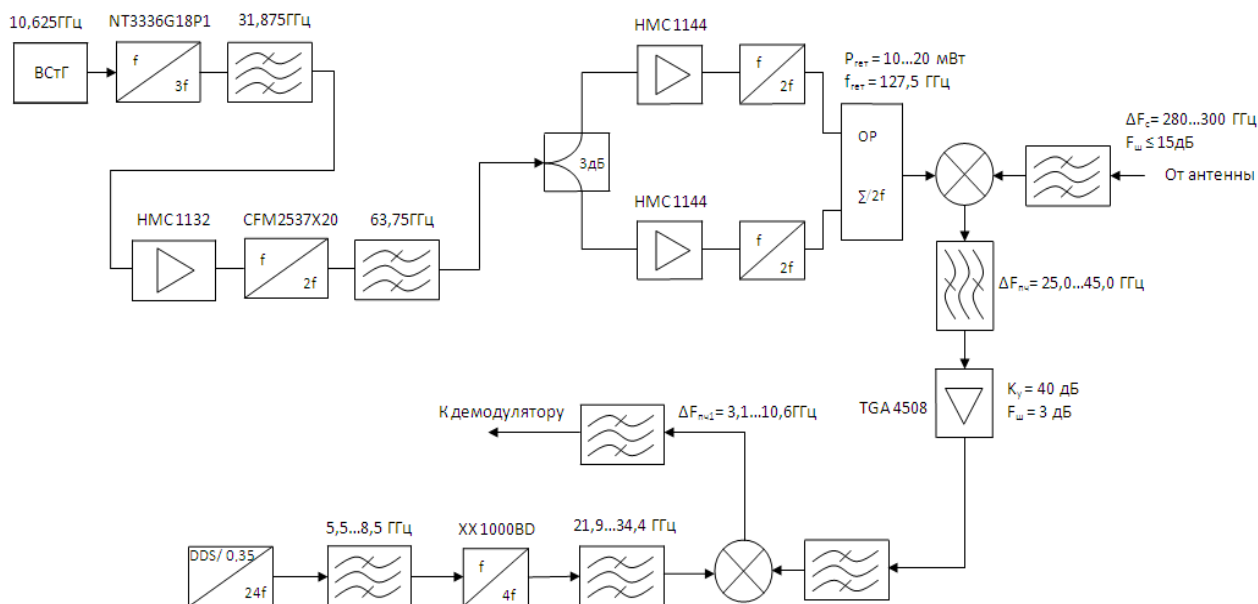


Рис. 2. Структурная схема интегрального приемника терагерцового диапазона

Гибкость схемы приемника заключается в том, что имеется возможность использовать уже готовые технологические решения (например, в технологии стандарта 802.11a скорость передачи данных до 54 Мбит/с, диапазон частот 5 ГГц или UWB, USB 2.0, диапазон частот 10 ГГц) и возможно вести обработку сигнала на второй промежуточной частоте (см. табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики сверхширокополосных и других систем

Скорость передачи данных, Мбит/с	Стандарт	Тип модуляции
480	UWB, USB 2.0	PPM/другой тип
90	Fast Ethernet	
54	802.11a	60-QAM, 16-QAM, BPSK, OFDM
20	802.11g	60-QAM, 16-QAM, BPSK, OFDM
11	802.11b	CCK
1	Bluetooth	GMSK

Важной характеристикой линии связи является удельная плотность трафика (табл. 2).

Таблица 2. Пространственная плотность трафика сверхширокополосных и других систем

Стандарт	Удельная плотность трафика, Мбит/с м ²
802.11b	1,0
Bluetooth	20,0
802.11a	83,0
UWB, USB 2.0	1000

Широкое использование терагерцовых технологий в линиях диапазона 0,1-3,0 ТГц позволяет реализовать потоки до 1000 Мбит/с м².

III. Моделирование функциональных узлов интегрального приемника

Моделирование включает в себя следующие основные функциональные элементы: балансный смеситель, гетеродин и усилитель промежуточной частоты. В процессе исследования моделирование и расчет характеристик интегрального приемника осуществлялся с помощью программного комплекса – Comsol Multiphysics.

Балансный смеситель построен по схеме преобразователя с накачкой на половинной частоте гетеродина. В качестве нелинейных элементов применены два включенных встречно-параллельно диода Шоттки AA138-B3. Конструкция преобразователя содержит два квазиоптических сверхразмерных волновода: со стороны гетеродина – волновод сечением 7,0×3,5 мм, а со стороны сигнала – металлодиэлектрический волновод сечением 10×10 мм. Эти волноводы объединены микросборкой, состоящей из планарной антенны, балансного смесителя и усилителя промежуточной частоты.

Конструктивно преобразователь частоты выполнен в виде волноводной вставки.

Субгармоническая схема частотного преобразователя частоты позволяет снизить рабочую частоту гетеродина, что в некоторой степени облегчает разработку гетеродинной цепи. Тем не менее, сохраняются жесткие требования к стабильности гетеродина и уровню фазовых шумов.

Введение в схему гетеродина квазиоптического открытого резонатора, обладающего свойством пространственного сложения мощностей, позволяет на существующей элементной базе реализовать гетеродин с необходимым уровнем мощности (10...13 дБм) и снизить до уровня 50 дБ и более аддитивные паразитные когерентные и некогерентные колебания гетеродина, благодаря его селективным свойствам. Гетеродин обладает уровнем фазовых шумов *минус* 80 дБн/10кГц и стабильностью частоты гетеродина $\pm 1 \times 10^{-7}$ [11].

Схема усилителя промежуточной частоты (УПЧ) состоит из двух каскадов и построена на микросхеме TGA 4508 фирмы TriQuint ($\Delta f_{ПЧ1} = 25-45$ ГГц; $K_y = 20$ дБ; $K_{ш} = 3,0$ дБ). Кроме усилительных микросхем, схема УПЧ содержит вторичные источники питания, формирующие стабилизированное напряжение.

УПЧ конструктивно совмещен с микросхемой смесителя для минимизации потерь слабого сигнала ПЧ. Полный коэффициент усиления УПЧ составляет 40 дБ.

IV. Конструктивные особенности и характеристики

Интегральный приемник выполнен в модульном исполнении с максимальным применением монолитных микросхем, что обеспечивает компактность конструкции,

а также удобство его сборки и монтажа. Для обеспечения качественной работы приемника предусмотрены вторичные источники питания, формирующие необходимые высокостабильные напряжения для всех узлов приемника. Сквозная частотная характеристика приемника имеет суммарный коэффициент усиления не менее 40 дБ, при этом неравномерность коэффициента передачи не превышает 3 дБ.

Сравнительные характеристики интегральных приемников приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики интегральных приемников терагерцового диапазона

Радиосистема	130 ГГц	250 ГГц	280-300 ГГц
Частота, ГГц	130...134	250	300
Полоса частот, ГГц	4 (до10)	до 20	20 и более
Скорость цифрового потока, Гбит/с	1,0	1,0 и более	1,0 и более
Коэффициент шума, дБ	8 – 10	10 – 12	15
Подавление зеркального канала, дБ	– 55	– 55	– 55
Коэффициент передачи приемного тракта, дБ, не менее	20	20	40
Мощность гетеродина, дБм, не менее	10	5	10
Фазовый шум гетеродина, дБн/10кГц	– 80	–80	– 80
Нестабильность частоты: - (time)	+/- 1×10 ⁻⁷		+/- 1×10 ⁻⁷
Модуляция	QAM 16, 32, 64	QAM 16, 32, 64	QAM 16, 32, 64
Технология	InP, GaAs	InP, GaAs	InP, GaAs

Выводы

Разработана конструкция преобразователя частоты на металлодиэлектрическом волноводе (10×10 мм), состоящая из квазиоптического открытого резонатора, сверхразмерных прямоугольных металлического и металлодиэлектрического волноводов и микросборки балансного смесителя с нелинейными элементами, позволяющая реализовать широкие полосы рабочих частот (20 ГГц и более).

Введение в гетеродин квазиоптического открытого резонатора, обладающего селективными свойствами и пространственным сложением мощности, позволяет достигнуть требуемого уровня мощности (10-13 дБм) гетеродина преобразователя частоты.

На базе разработанных электронных компонентов и узлов спроектирована базовая конструкция интегрального приемника диапазона частот 280-300 ГГц с коэффициентом шума на уровне 15дБ, которая выполнена в модульном исполнении с максимальным применением монолитных микросхем.

Решена научная задача, которая заключается в решении проблемы повышения рабочего диапазона средств телекоммуникаций путем предложенных авторами конкретных методов и технических решений.

Список литературы:

1. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В. Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – №2. – 2016. – С. 42-49.
2. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О., Нарытник Т.М. Безпроводові системи зв'язку субтерагерцового та терагерцового діапазонів // Цифрові технології. – 2014. – Вип. 16. – С. 40-59.
3. Исаев В.М., Кабанов И.Н., Комаров В.В., Мецанов В.П. Современные радиоэлектронные системы // Доклады ТУСУРа. –2014. – № 4 (34). – С. 5-21.
4. Майборода І.М., Стороженко І.П., Бабенко В.П., Кайдаш М.В. Огляд досягнень в терагерцових комунікаційних системах // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України, 2016. Вип. № 1 (27). – С. 45-48.
5. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С. 205-209.
6. Jastrow C., Munter K., Piesiewicz R., Kurner T., Kochand M., Kline-Ostmann T. 300 GHz transmission system // Electronics Letters. – 2008. – Vol. 44, No.3. – P.75-77.
7. Peter H. Siegel. Terahertz technology // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – Vol. 50, No.3. – P. 910-928.
8. Денбновецький С.В., Лецишин О.В. Електронні системи // Навчальний посібник. – К.: НТУУ“КПІ”, 2011. – 288 с.
9. Kukutsu N., Kado Y. Overview of millimeter and terahertz wave application Research // NTT Technical Review / Special Feature: Applied Technology for Millimeter and Terahertz Electromagnetic Waves. – 2009. – Vol. 7, No.3. – P. 1-6.
10. Takano K., Katayama K., Amakawa S., Yoshida T., Fujishima M. Wireless digital data transmission from a 300 GHz CMOS transmitter // Electronics Letters. – 2016. – Vol. 52, No. 15. – P. 1353–1355.
11. Ilchenko M.Ye., Narytnik T.N., Denbnovetskii S.V., May O.V., Lutchak O.V., Fisun A.I., Belous O.I. Simulation of functional units of the terahertz band transmitting and receiving radio systems // Telecommunication and Radioengineering. – 2016. – Vol. 75, №15. – P. 1027-1039.

ПОВІДОМЛЕННЯ

Інформаційне повідомлення щодо проведення 14-ї IEEE Міжнародної конференції «Перспективні тенденції в радіоелектроніці, телекомунікаціях та комп'ютерній інженерії» (IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering).



Шановні колеги, в період з 20 по 24 лютого 2018 року відбудеться 14-та IEEE Міжнародна конференція «Перспективні тенденції в радіоелектроніці, телекомунікаціях та комп'ютерній інженерії» (IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering).

НАПРЯМКИ РОБОТИ: (робочою мовою конференції):

1. Signal and electronic circuit's theory.
2. Simulation in radio electronics, communications and computer sciences.
3. Simulation of electro-technical and electro-energetic systems.
4. Models, algorithms, software and hardware construction means of information and communication and radio electronic devices and systems.
5. Electronics: systems and devices, micro- and nanotechnologies.
6. Telecommunications:wired and wireless systems, network services, management.
7. Information systems and technologies.
8. Quality, reliability and diagnostics of electronic and information systems and devices.
9. ICT systems and networks .
10. Internet of Things.
11. Cybersecurity.
12. Information processing.
13. Biomedical engineering.
14. Antennas, microwave technology and electromagnetic compatibility.
15. Radar systems.
16. Satellite communication, navigation, positioning systems and monitoring.
17. Computer-aided design.

Більш детальна інформація викладена на [сайті конференції](#).