

3. Lars M.H., Bjorn F., Per-Olov F., Bistatic Experiment with Ultra-Wideband VHF- band Synthetic Aperture Radar. *7th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Friedrichshafen, Germany. 2-5 June- Friedrichshafen, Germany, 2008, p. 131-135
4. Borisenkov A.V., Goriachkin O.V., Dolgopolov V.N., Zhengurov B.G., Kurkov I.G., Khokhlov S.M. Nekotorye napravlenija razvitiija mnogopozicionnyh radiotekhnicheskikh system [Areas development of the multiposition radio systems]. *Sbornik nauchnyh trudov XX MNTK «Radiolokacija, navigacija, svjaz'»*, Voronez, 2014, pp. 1014-1022.

Received 28.05.2015

УДК 621.371

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ RADIO-OVER-FIBER

Нарышкин М.И.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: nmi@rambler.ru*

В работе рассматривается концепция построения распределенной сети радиосвязи на базе технологии Radio-over-Fiber. Представлен обзор и классификация систем передачи радиосигналов по волоконно-эфирной структуре, методы их реализации. Рассмотрены типовые структурные схемы построения таких систем, их основные компоненты.

Ключевые слова: Radio-over-Fiber, беспроводные сети, сети радиосвязи, волоконно-эфирная структура, центральная станция, базовая станция, удаленный антенный модуль, передача радиосигналов по оптическим волокнам.

Введение

В настоящее время технология Radio-over-Fiber (RoF), реализующая передачу радиочастотного сигнала по волоконно-эфирной структуре, является одним из наиболее перспективных путей построения распределенных сетей радиосвязи.

Первые публикации в рамках данного направления (см., например, [1-4] и др.) датированы началом 90-х годов прошлого века и в основном посвящены вопросам моделирования и экспериментальной реализации беспроводных микросотовых телефонных сетей связи на базе технологии RoF.

На сегодняшний день в качестве ключевых приложений RoF можно выделить следующие [5 - 10]:

- сотовые сети связи: мобильный трафик транслируется между центральной и базовой станциями по волоконно-эфирной структуре;
- беспроводные локальные сети передачи данных (LAN): в частности, беспроводные LAN, функционирующие на частотах 2,4 и 5 ГГц;
- системы передачи видеосигнала: проводные и беспроводные городские сети широкополосного доступа, в том числе телевизионного вещания;
- беспроводные сети связи между транспортными средствами, а также беспроводные

сети контроля и управления интеллектуальными транспортными системами.

Как правило, данные сети включают центральную станцию (ЦС), базовые станции (БС) и абонентские терминалы (АТ). При этом БС соединяются с ЦС волоконно-оптическими линиями, а АТ с БС по радиоканалам через удаленный антенный модуль (Remote Antenna Unit – RAU) (см. рис. 1).

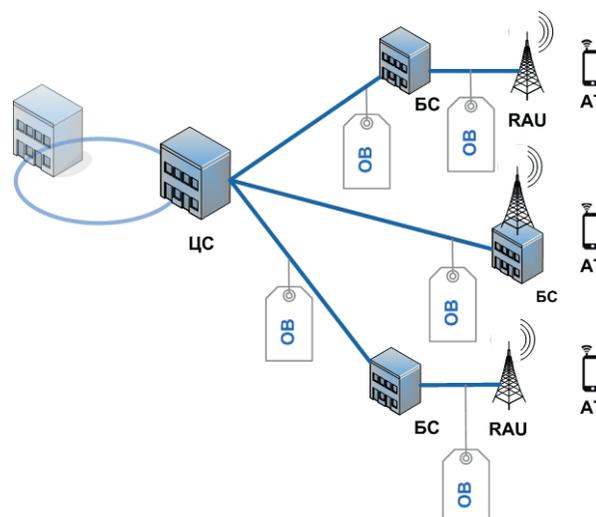


Рис. 1. Обобщенная структурная схема построения сети радиосвязи на базе технологии RoF

Среди очевидных преимуществ систем RoF по сравнению с традиционными технологиями

радиосвязи целесообразно выделить следующие [5-10]:

- малое затухание сигнала в оптических волокнах;
- практически неограниченная полоса пропускания оптического волокна;
- невосприимчивость к мешающим электромагнитным влияниям и электромагнитным помехам;
- защита от несанкционированного доступа и промышленного шпионажа;
- существенное упрощение RAU, а также снижение расхода потребляемой электроэнергии RAU;
- возможность функционировать одновременно с несколькими операторами, мультисервисность (распределительная система RoF по факту является прозрачной к формату транслируемого сигнала);
- высокая гибкость и низкая стоимость реконфигурирования сети (например, при передаче GSM трафика оборудование RoF может быть оперативно временно развернуто в определенной территориальной зоне на период прогнозируемой пиковой нагрузки и по окончании последней вновь перегруппировано на исходные или новые позиции).

Вместе с тем в ряде работ [6, 8, 9] отмечается, что, поскольку технология RoF изначально базируется на модуляции и детектировании аналогового радиосигнала, то и основными проблемами внедрения RoF являются ограничения по коэффициенту шума и динамическому диапазону, характерным для «традиционных» систем радиосвязи, что создает все предпосылки для разработки и усовершенствования как аппаратной части, так и соответствующих форматов модуляции и алгоритмов детектирования сигнала.

1. Классификация систем RoF

В настоящее время выделяют три основных подхода, реализующих передачу радиосигналов по волоконно-эфирной структуре [9-12]. Это, в частности, следующие три системы RoF:

- RFoF (Radio Frequency over Fiber): «радиочастота по волокну»;
- IFoF (Intermediate Frequency over Fiber): «промежуточная частота по волокну»;
- BBoF (BaseBand-over-Fiber): «основной сигнал по волокну».

Обобщенная структурная схема, поясняющая принцип действия каждого из перечисленных методов, представлена на рис. 2. Данная схема составлена на основе предложенных в работе [11] диаграмм, условно отображающих соотношения спектров радиосигнала и оптической несущей оптического излучения, возбуждаемого когерентным источником.

1.1. Системы RFoF

В системах RFoF передача радиосигналов по оптическим волокнам осуществляется непосредственно на частоте трансляции системы радиосвязи без последующего перехода в RAU БС на более высокие или, напротив, низкие частоты. Такой подход, в частности, активно используется в сотовых сетях связи, а также беспроводных локальных сетях передачи данных (WLAN – Wireless Local Area Network) в диапазоне 5 ГГц. Для большинства систем RFoF транслируемый радиосигнал осуществляет прямую модуляцию по интенсивности оптического излучения, генерируемого когерентными источниками оптического излучения, в том числе относительно недорогими [10, 11] – например, полупроводниковыми лазерами, коротковолновыми лазерами поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором (VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser) или неохлаждаемыми лазерами с распределенной обратной связью (DFB – Distributed Feedback Laser) с внутренней модуляцией. Таким образом, в RFoF аналоговый радиосигнал передается по волокну на заданной оптической несущей и, соответственно, в оптическом интерфейсе, от ЦС до БС, где в результате прямого детектирования и преобразования в электрический интерфейс усиливается и далее излучается антенной.

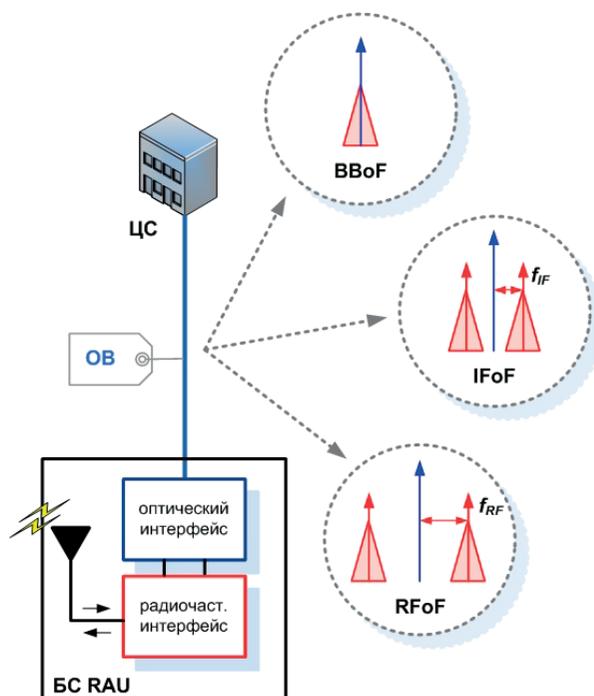


Рис. 2. Обобщенная структурная схема классификации систем передачи радиосигналов по оптическим волокнам

К основным преимуществам систем RFoF относят простую реализацию схемы БС при всех полученных преимуществах централизованного

управления и поддержке большого количества стандартов беспроводных коммуникаций. При этом внедрение RFoF в основном ограничено пределами по частоте модуляции когерентных источников оптического излучения. Например, для подавляющего большинства полупроводниковых лазеров это значение не превышает 3 ГГц, в то время как для намного более дорогостоящих коммерческих модулей с лазерами DFB оно составляет не более 20 ГГц [10 – 12]. Это фактически делает неприемлемым их использование в системах микроволнового диапазона, в частности, на беспроводных персональных сетях (WPAN – Wireless Personal Area Networks) в диапазоне 60 ГГц или пикосотовых сетях в диапазоне 38 ГГц. Наконец, с увеличением частоты передаваемого радиосигнала системы RFoF возникают проблемы искажения сигналов, связанные с сильным проявлением хроматической дисперсии в оптических волокнах, что неизбежно сказывается на ограничениях протяженности волоконно-оптической линии. Обо-

общенная структурная схема системы RFoF с прямой внешней модуляцией представлен на рис. 3.

1.2. Системы IFoF

В отличие от RFoF в системах IFoF информационный радиосигнал на пониженной промежуточной частоте, которая для подавляющего большинства систем не превышает 10 ГГц [9 – 12], модулирует заданную оптическую несущую когерентного источника излучения с помощью внутреннего или внешнего модулятора и затем также передается в оптический линейный тракт с выхода ЦС. Поэтому далее в RAU БС предварительно реализуется переход с промежуточной на собственную частоту информационного радиосигнала, после чего последний излучается с антенны. Это устраняет необходимость применения высокоскоростных оптоэлектронных компонентов по сравнению с системами RFoF, снижает чувствительность системы к проявлению хроматической диспер-

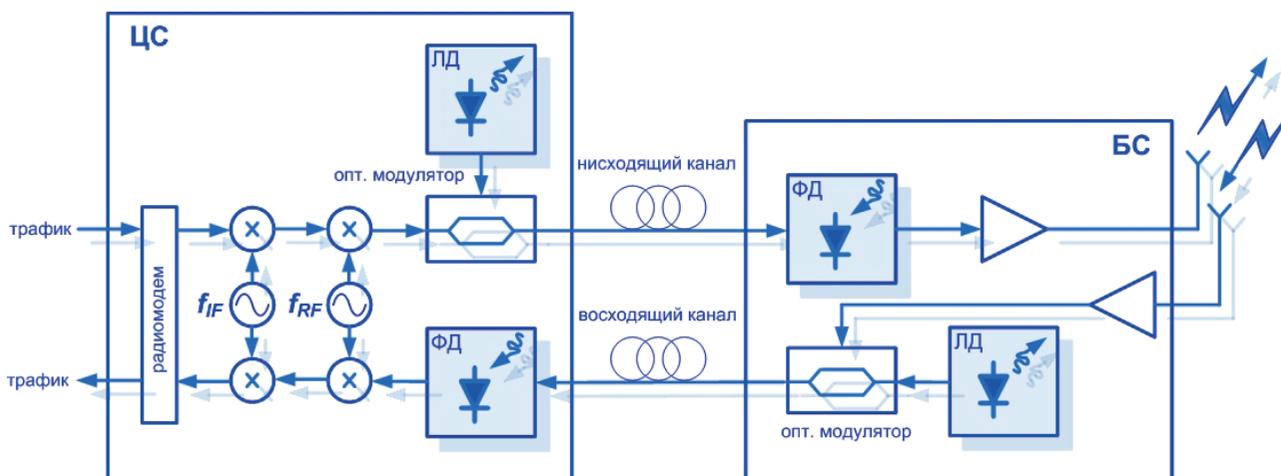


Рис. 3. Структурная схема системы RFoF с прямой внешней модуляцией

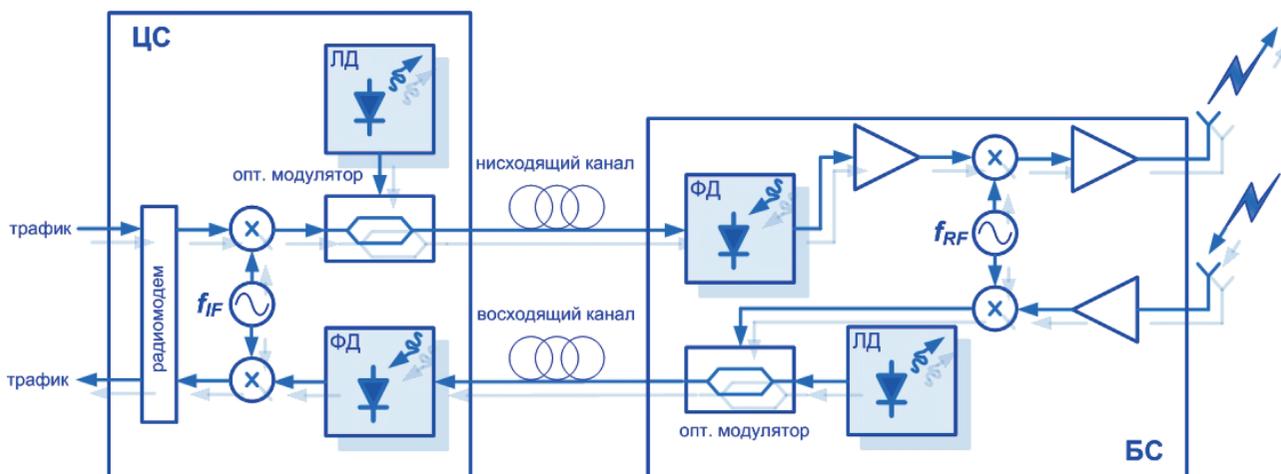


Рис. 4. Структурная схема системы IFoF с прямой внешней модуляцией

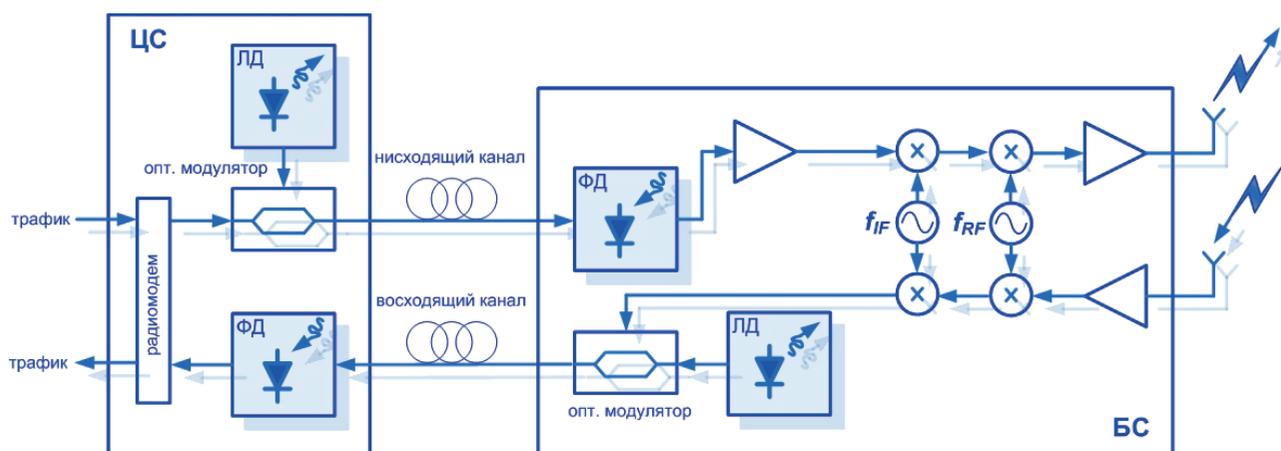


Рис. 5. Структурная схема системы ВВoF с прямой внешней модуляцией

сии, но при этом усложняет схему RAU БС за счет необходимости включения гетеродина и преобразователя частоты, что в целом может снизить искомую гибкость и реконфигурируемость сети. В качестве примера, на рис. 4 приведена структурная схема системы IFoF с прямой внешней модуляцией.

1.3. Системы VBoF

В системах VBoF основной сигнал в базовой полосе частот, непосредственно представляющий собой битовую последовательность, в ЦС конвертируется в оптический интерфейс (фактически так же в результате модуляции оптической несущей когерентного источника оптического излучения) и далее передается по волоконно-оптической линии до БС, где осуществляется его детектирование и преобразование в радиосигнал как результат перехода в заданный диапазон с повышением частоты. Структурная схема системы VBoF с прямой внешней модуляцией приведена на рис. 5. Если системы IFoF во многом ближе к исходной архитектуре построения аналоговых сетей радиосвязи, то VBoF, напротив, сопоставимы с оптическими сетями, передача данных в которых изначально осуществляется в цифровом формате. Последний факт существенно упрощает схему реализации «оптической» части системы VBoF, однако RAU БС, напротив, усложняется дополнительными компонентами, обеспечивающими цифровую обработку радиосигнала, что в целом снижает прозрачность сети.

1.3. Системы Digitized RFoF и IFoF

Следует отметить, что если на самых первых этапах разработки и внедрения технологии RoF системы RFoF и IFoF позиционирова-

лись как аналоговые, то в настоящее время уже достаточно давно известны их модификации, которые поддерживают передачу радиосигналов уже в цифровом формате. Такие системы получили название DRFoF и DIFoF (Digitized RFoF и Digitized IFoF – «оцифрованные» RFoF и IFoF, соответственно). Для этих систем при передаче сигнала от ЦС до БС также используются все преимущества волоконно-оптической сети.

При этом весь сложный комплекс оборудования для обработки сигнала размещается в ЦС, в то время как в RAU БС присутствует минимальный набор компонентов «внешнего» интерфейса, который по факту состоит из аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей (АЦП и ЦАП), соответственно.

Однако наличие этих компонентов накладывает определенные ограничения на применение систем DRFoF для беспроводных сетей за пределами миллиметрового диапазона радиоволн: полоса пропускания АЦП должна быть больше частоты несущей радиосигнала. Данная проблема успешно решается в системах DIFoF, в которых сначала осуществляется преобразование с понижением частоты несущей исходного радиосигнала до промежуточной, что позволяет успешно преодолеть ограниченные возможности АЦП. Так, типовым примером использования систем DIFoF на коммерческих беспроводных сетях являются известные спецификации взаимодействия функциональных блоков БС и RAU, разработанные инициативными группами CPRI (Common Public Radio Interface – «общий открытый радио интерфейс») и OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative – «открытая архитектура базовой станции») [12, 13].

2. Методы передачи радиосигналов по волоконно-эфирной структуре в системах RoF

В общем случае выделяют следующие подходы, обеспечивающие реализацию передачи радиосигналов по волоконно-эфирной структуре в системах RoF [9; 12; 14-15]:

- прямой метод;
- удаленное гетеродинное детектирование (RHD – Remote Heterodyne Detection);
- умножение частот в оптическом интерфейсе, или «оптическое» умножение частот (OFM – Optical Frequency Multiplication);
- частотная/фазовая автоподстройка в оптическом интерфейсе, или «оптическая» частотная/фазовая автоподстройка (OPLL/OPLL – Optical Frequency/Phase Locked Loop).

2.1. Прямой метод

Прямая модуляция интенсивности источника оптического излучения, как было отмечено выше, является простейшим и наименее дорогостоящим методом, обеспечивающим конвертацию радиосигнала в оптический интерфейс с последующей передачей по оптическим волокнам от ЦС к БС и прямым детектированием на фотоприемном устройстве. Здесь могут использоваться, например, недорогие полупроводниковые лазеры с внутренним модулятором, ток накачки которых непосредственно модулируется транслируемым радиосигналом. Однако более эффективно прямой метод реализуется в передающих устройствах на базе лазеров с внешним оптическим модулятором, в частности, модулятором Маха-Цендера. В данном случае когерентный источник возбуждает непрерывный поток оптического излучения на заданной длине волны, подаваемый на «оптический» вход внешнего модулятора. При этом на «электрический» вход поступает оригинальный радиосигнал, который и осуществляет управление модулятором. В свою очередь, после прохождения волоконно-оптической линии и далее процесса прямого детектирования фототок фотодиода будет являться репликой оригинального модулирующего радиосигнала как в случае лазера с внутренним, так и внешним оптическим модуляторами.

2.2. Удаленное гетеродинное детектирование (RHD)

Как было отмечено выше, при переходе в миллиметровый диапазон радиоволн для систем RoF с использованием прямой модуляции возникают проблемы, связанные с проявлением хроматической дисперсии в оптических волокнах [11]. Это создало все необходимые предпосылки для разра-

ботки альтернативного подхода на базе оптического гетеродирования. Подробное описание метода RHD, включая детализированное описание структурных схем и результаты экспериментальной апробации, представлены, в частности, в первых работах [16-17], датированных еще второй половиной 90-х г. прошлого века. Так, в фотоприемном модуле в процессе выполнения преобразования интерфейсов фотодиод фактически выступает в роли когерентного смесителя частот, что и обуславливает возможность реализации гетеродинного подхода в системах RoF. Один из способов получения данного эффекта фактически сводится к применению в передающем модуле внешнего оптического фазового модулятора для возбуждения нескольких оптических боковых полос и далее фильтрации на приемной стороне искомой компоненты. Другой подход предполагает использование двух отдельных когерентных источников оптического излучения, подобранных таким образом, чтобы разность длин волн (частот), генерируемых этими лазерами потоками оптического излучения, была равна частоте несущей транслируемого радиосигнала.

Метод RHD обеспечивает возможность перехода на высокие частоты, которая фактически ограничена полосой пропускания фотоприемника и не требует применения высокочастотных оптоэлектронных компонентов. Кроме того, RHD существенно снижает чувствительность системы к хроматической дисперсии, поскольку в данной схеме, в отличие от прямого метода, информационным сигналом «нагружается» только одна боковая полоса. Основным недостатком RHD является высокая чувствительность таких систем к фазовому шуму лазера, чирпу и флуктуации длины волны генерации оптических несущих, с точки зрения чистоты и стабильности несущей частоты радиосигнала.

2.3. Умножение частот в оптическом интерфейсе (OFM)

Метод OFM активно используется на внутри-объектовых сетях беспроводного доступа на уровне пикосот, соединительные линии которых реализованы на базе полимерных или кварцевых многомодовых оптических волокон. Общая концепция OFM, предложенная еще в работе [18] и впоследствии расширенная группой авторов [19-20] на указанный случай, заключается в следующем. Здесь оптический передающий модуль реализуется на основе перестраиваемого лазерного источника, рабочая длина волны которого периодически дискретно меняется в некотором волновом диапазоне с низкой частотой переключения в области задан-

ной оптической несущей, в большинстве случаев соответствующих одному из традиционных окон прозрачности. Излучение с периодически изменяющейся рабочей длиной волны модулируется по интенсивности в соответствии с поступающим на вход модулятора радиосигнала. В свою очередь, на входе фотоприемного устройства устанавливается периодический полосовой оптический фильтр, который в исходной схеме [19] было предложено реализовать на основе интерферометра Фабри-Перо, а в более поздней работе [20] – на основе интерферометра Маха-Цендера. В результате спектральная передаточная характеристика указанного фильтра представляет собой совокупность пиков, равномерно распределенных в искомой полосе пропускания с заранее определенным интервалом. При этом центр характеристики соответствует основной рабочей длине волны источника передающего модуля. В результате модулированное по интенсивности оптическое излучение с периодически изменяющейся длиной волны осуществляет дискретное «сканирование» пиков передаточной характеристики фильтра, благодаря чему и выполняется операция умножения частоты: на вход фотодетектора поступает оптический сигнал уже на частоте пропорциональной числу пиков и частоте переключения искомого оптического диапазона коротких длин волн. После детектирования и проведения соответствующих процедур усиления и подавления боковых гармоник и шумов высокочастотный сигнал непосредственно направляется в излучатель антенны RAU БС.

2.4. Частотная/фазовая автоподстройка в оптическом интерфейсе

Как следует из названия данного метода, OFLL направлена на поддержание необходимого искомого среднего сдвига частот, однако при этом не обеспечивает подавление частотных флуктуаций, обусловленных фазовым шумом, в то время как OPLL как раз, напротив, локализует слабые фазовые возмущения. Передающий модуль ЦС OFLL/OPLL базируется на двух лазерах, генерирующих сигналы микроволнового диапазона в области частот 14 ГГц [9, 14], выходы которых объединены «X»-разветвителем, один выходной порт которого подключается непосредственно в линию, а второй формирует петлю обратной связи. Последняя, в общем случае, состоит из фотодиода, усилителя, умножителя частот, куда также поступает опорный сигнал с выхода гетеродина, частотного или фазового детектора, фильтра обратной связи и далее замыкается на «ведомом» лазере. Очевидным ключевым преимуществом данного метода является

возможность формирования высококачественного радиосигнала. OPLL также выгодно отличается в том числе возможностью отслеживания температурных флуктуаций, в то время как OFLL может быть реализована с использованием относительно недорогих типовых DFB-лазеров, а OPLL требует применения более сложных когерентных источников оптического излучения

Заключение

Рассмотрена общая концепция построения распределенной сети радиосвязи на базе технологии RoF. Представлен обзор и классификация таких систем передачи радиосигналов по волоконно-эфирной структуре, а также методов их реализации. Приведены их типовые структурные схемы построения, перечислены основные компоненты. Выявлены и показаны основные проблемы реализации сетей на базе технологии RoF в зависимости от используемой системы и применяемого в ней метода передачи радиосигнала.

Литература

1. Cooper J. «Fibre/Radio» for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network // *Electronic Letters*. Vol. 26, No 24, 1990. – P. 2054 – 2056. doi: 10.1049/el:19901325.
2. Fye D.M. Design of fiber optic antenna remoting links for cellular radio applications // *Proceedings of IEEE 40th Vehicle Technology Conference*, 1990. – P. 622 – 625. doi: 10.1109/VETEC.1990.110394.
3. Chu T.-S., Gans M.J. Fiber optic microcellular radio // *IEEE Transactions on Vehicle Technologies*. Vol. 40, No. 3, 1991. – P. 559 – 606. doi: 10.1109/25.97514.
4. Komaki S., Tsukamoto K., Hara S., Morigana N. Proposal of fiber and radio extension link for future personal communications // *Microwave and Optical Tech. Letters*. Vol. 6, No. 1, 1993. – P. 50 – 55. doi: 10.1002/mop.4650060115.
5. Yadav J., Jaiswal A.K., Kumar M. Radio over fiber technology // *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineer-ing*. Vol. 9, No. 3, 2014. – P. 83 – 87.
6. Zin A.M., Bongsu M.S., Idrus S.M., Zulkiffi M. An overview of Radio-over-Fiber network technology // *Proceedings of IEEE International Conference on Photonics*, 2010. – P. 1 – 3. doi: 10.1109/ICP.2010.5604429.
7. Vyas A.K., Agrawal N. Radio over Fiber: Future Technology of Communication // *International Journal of Emerging Trends and technology in*

- Computer Science. Vol. 1, No. 2, 2012. – P. 233 – 237.
8. Karthikeyan R., Prakasam S. A survey on Radio over Fiber (RoF) for wireless broadband access technologies // International Journal of Computer Applications. Vol. 64, No. 12, 2013. – P. 14 – 19.
 9. Pooja M., Saroj Sh., Manisha Bh. Advantages and limitations of radio over fiber system // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. Vol. 4, No. 5, 2015. – P. 506 – 511.
 10. Reddy V., Jolly R. Radio over fiber technology (RoF) and integration of microwave and optical network for wireless access // International Journal of Compute Applications. Proceedings of International Conference and Workshop on Emerging Trends and Technology, 2015. – P. 9 – 13.
 11. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combine two worlds // Nature. Vol. 1, 2007. – P. 319 – 330. doi:10.1038/nphoton.2007.89.
 12. Lim Ch., Yang Y., Nirmalathas A. Transport schemes for wireless technologies: transmission performance and energy efficiency // Photonics. Vol.1, 2014. – P. 67 – 83.
 13. CPRI – перспективный стандарт для базовых станций // Мобильные телекоммуникации. №6, 2006. – С. 33 – 36.
 14. Kumar N., Garg A., Panwar S. A review paper on radio over fibre technology // International Journal on Applied Engineering Research. Vol. 7, No. 11, 2012. – P. 1992 – 1995.
 15. Kumari N., Kaushik P.K. A review on radio over fiber technology // International Journal on Advance Research in Science and Engineering. Vol. 3, No. 2, 2014. – P. 167 – 179.
 16. Hofstetter R., Schmuck H., Heidemann R. Dispersion effects in optical millimeter-wave systems using self-heterodyne method for transport and generation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. Vol. 43, No 9, 1995. – P. 2263 – 2269. doi: 10.1109/22.414574.
 17. Gliese U., Nielsen T. N., Norskov S., Stubkjaer K. E. Multifunctional fiber - optic microwave links based on remote heterodyne detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. Vol. 46, No 5, 1998. – P. 458 – 468. doi: 10.1109/22.668642.
 18. Walker N. G., Wake D., Smith I.C. Efficient millimeter wave signal generation through FM-IM conversion in dispersive optical fibre link // Electronic Letters. Vol. 28, No 21, 1992. – P. 2027 – 2028. doi: 10.1049/el:19921299.
 19. Koonen T., Ng'oma A., Smulders P., van den Boom H., Monroy I.T., Khoe G.-D. In-house networks using multimode polymer optical fiber for broadband wireless services // Photonic Network Communications. Vol. 5, No 2, 2003. – P. 177 – 187. doi: 10.1023/A:1022172511450
 20. Ng'oma A., Koonen A.M.J., Monroy I.T., van den Boom H.P.A., Smulders P.F.M., Khoe G.- D. Optical frequency up-conversion in multimode and single-mode fibre radio systems // Proceedings of SPIE. Vol. 5466, 2004. – P. 169 – 177. doi:10.1117/12.548963

Получено 12.11.2015

Нарышкин Михаил Иванович, соискатель Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. 8-915-141-07-14. E-mail: nmi@rambler.ru

CONCEPT OF DISTRIBUTED WIRELESS NETWORK BASED ON RADIO-OVER-FIBER TECHNIQUE

Naryshkin M.I.

Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: bma@oao-avtomatika.ru

This work is concerned on description of the concept of distributed wireless networks based on Radio-over-Fiber technology, which is integration of wireless and fiber optic networks. The concept of RoF means to transport data over optical fibers by modulating lightwave with radio frequency signal or at the intermediate frequency/baseband. That provides to take advantage of the low loss and large bandwidth of an optical fiber together with immunity to electromagnetic influence, flexibility and transparency. A brief overview of key RoF techniques as well as comparative analysis is presented.

Keywords: Radio-over-Fiber, wireless networks, integration of wireless and fiber optic networks, central office, base station, remote antenna unit.

DOI: 10.18469/ikt.2015.13.2.12

Naryshkin Mikhail Ivanovich, external PhD-student, Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation. Tel.: +79151410714. E-mail: nmi@rambler.ru

References

1. Cooper J. «Fibre/Radio» for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network. *Electronics Letters*, 1990, vol. 26, no 24, pp. 2054–2056. doi: 10.1049/el:19901325.
2. Fye D.M. Design of fiber optic antenna remoting links for cellular radio applications. *Proc. of IEEE 40th Vehicle Technology Conference*, 1990, pp. 622–625. doi: 10.1109/VETEC.1990.110394.
3. Chu T.-S., Gans M.J. Fiber optic microcellular radio. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 1991, vol. 40, no. 3. – pp. 559–606. doi: 10.1109/25.97514.
4. Komaki S. et al. Proposal of fiber and radio extension link for future personal communications. *Microwave and Optical Tech. Letters*, 1993, vol. 6, no. 1, pp. 50–55. doi: 10.1002/mop.4650060115.
5. Yadav J. et al. Radio over fiber technology. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2014, vol. 9, no. 3, pp. 83–87.
6. Zin A.M. et al. An overview of Radio-over-Fiber network technology. *Proc. of IEEE International Conference on Photonics*, 2010, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICP.2010.5604429.
7. Vyas A.K., Agrawal N. Radio over Fiber: Future Technology of Communication. *International Journal of Emerging Trends and technology in Computer Science*. 2012, vol. 1, no. 2, pp. 233–237.
8. Karthikeyan R., Prakasam S. A survey on Radio over Fiber (RoF) for wireless broadband access technologies. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 64, no. 12, pp. 14–19.
9. Pooja M. et al. Advantages and limitations of radio over fiber system. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2015, vol. 4, no. 5, pp. 506–511.
10. Reddy V., Jolly R. Radio over fiber technology (RoF) and integration of microwave and optical network for wireless access. *International Journal of Compute Applications. Proc. of International Conference and Workshop on Emerging Trends and Technology*, 2015, pp. 9–13.
11. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combine two worlds. *Nature*, 2007, vol. 1, pp. 319–330. doi: 10.1038/nphoton.2007.89.
12. Lim Ch. Et al. Transport schemes for wireless technologies: transmission performance and energy efficiency. *Photonics*, 2014, vol.1, pp. 67–83.
13. CPRI is advanced standard for base stations. *Mobile telecommunications*, 2006, no. 6, pp. 33–36.
14. Kumar N. et al. A review paper on radio over fibre technology. *International Journal on Applied Engineering Research*, 2012, vol. 7, no. 11, pp. 1992–1995.
15. Kumari N., Kaushik P.K. A review on radio over fiber technology. *International Journal on Advance Research in Science and Engineering*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 167–179.
16. Hofstetter R. et al. Dispersion effects in optical millimeter-wave systems using self-heterodyne method for transport and generation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1995, vol. 43, no 9, pp. 2263–2269. doi: 10.1109/22.414574.
17. Gliese U. et al. Multifunctional fiber - optic microwave links based on remote heterodyne detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1998, vol. 46, no. 5, pp. 458–468. doi: 10.1109/22.668642.
18. Walker N. G. et al. Efficient millimeter wave signal generation through FM-IM conversion in dispersive optical fibre link. *Electronic Letters*, 1992, vol. 28, no 21, pp. 2027–2028. doi: 10.1049/el:19921299.
19. Koonen T. et al. In-house networks using multimode polymer optical fiber for broadband wireless services. *Photonic Network Communications*, 2003, vol. 5, no 2, pp. 177–187. doi: 10.1023/A:1022172511450.
20. Ng'oma A. et al. Optical frequency up-conversion in multimode and single-mode fibre radio systems. *Proc. of SPIE*, 2004, vol. 5466, pp. 169–177. doi:10.1117/12.548963.

Received 12.11.2015