

Системы телекоммуникации, связи и защиты информации

УДК 621.39

М.Е. Ильченко, д-р. техн. наук, К.С. Сундучков, д-р техн. наук, Б.Н. Шелковников, канд. техн. наук, А.С. Ящук, Ю.Ю. Тихоненко, С.А. Осипчук, М.В. Поляков

Проблемы построения мультисервисной распределительной сети доступа к мобильному терминалу абонента, движущегося с высокой скоростью

В данной статье рассмотрена многоуровневая задача, возникающая при построении мультисервисной сети доступа к мобильному терминалу (МТ) абонента, который движется с высокой скоростью. Цель работы: рассмотреть возможные варианты решения задачи на каждом уровне сети доступа. В статье обсуждается архитектура сети, рассмотрены методы формирования информационного сигнала и технологии реализации МТ абонента. Предложенные решения позволяют мультиплексировать множество широкополосных услуг в один поток и принимать сигнал с полосой в несколько ГГц с дальнейшим преобразованием его для выделения нужной услуги.

A multilevel problem arising in the construction of a multiservice access network to a subscriber's mobile terminals moving at high speed is considered in this paper. Objective is to examine possible solutions of the problem at each access network level. The article discusses the network architecture, the methods of the information signal forming and technologies of the subscriber's mobile terminals implementation are described. The proposed solutions enable to multiplex set of broadband services into one stream and receive the several GHz bandwidth signal with further transformation to select the desired service.

Ключевые слова: мультисервисные радиооптические сети, миллиметровый диапазон, гигабитные сети, формирование OFDM сигнала, мобильный терминал. LTCC, LCP, RXP.

Введение

Стремительное расширение спектра телекоммуникационных услуг ведет к необходимости увеличения пропускной способности (ПС) канала доступа абонента к сети с ресурсом в несколько Гбит/с [1]. В проводных системах такая скорость легко реализуется с использованием пассивных оптических сетей, а в радиосетях достигается

только путем повышения несущих частот [2]. Четвертое поколение мобильных сетей (4G) обеспечивает ПС канала до 1 Гбит/с абонентам, которые движутся с низкой скоростью (режим пешехода), и до 100 Мбит/с – при повышенной мобильности [3]. Достигнуть требуемых скоростей доступа мобильных пользователей к мультимедийным ресурсам позволяет гибридная радиооптическая технология RoF (Radio over Fiber), объединяющая высокую ПС проводных и портативность беспроводных сетей [4]. Допустимая скорость движения мобильных пользователей вскоре повысится до 200 км/час [5]. Такой сценарий станет актуальным для высокоскоростных автомобильных или железнодорожных магистралей. Проблемы, связанные с переходом МТ от одной базовой станции (БС) к другой (handover), ограничивают скорости движения значениями 100-150 км/ч [6-8]. При этом скорость передачи данных не превышает 100 Мбит/с.

Необходимость предоставления множества широкополосных услуг одновременно многим абонентам поднимает вопрос формирования общего суммарного сигнала, который передается по оптоволоконному кабелю к БС, в виде, удобном для выделения нужной услуги в МТ. Эффективное использование ресурса также играет важную роль. В работе [9] используется метод формирования сигнала, который обеспечивает работу до 30 пользователей одновременно, однако при этом доступна только одна одинаковая для всех услуга.

Архитектура построения и технология изготовления МТ определит качество связи, его стоимость и внешние характеристики (масса, габариты, дизайн) [10]. В работе [11] представлен приемо-передающий модуль для систем типа "точка-точка" с ПС канала 1,25 Гбит/с. Мобильность устройства и возможность селективного выделения услуги из общего потока не предусмотрены.

Таким образом, учитывая мировую тенденцию развития высокоскоростных услуг и требо-

вания абонентов относительно их предоставления на транспортных магистралях, возникает многоуровневая задача, а именно: нахождение архитектуры распределительной сети и способа формирования мультисервисного сигнала, определение структуры МТ и технологии его производства. На основе проведенных исследований с помощью численных методов необходимо создать многоуровневый проект сети, в которой может обеспечиваться доступ абонентов, движущихся со скоростью до 200 км/ч, к информационным ресурсам с ПС канала в несколько Гбит/с.

Что касается канала запросов с низкой ПС, то предполагается, что он будет осуществляться по сетям типа WiMAX, GSM и им подобным.

1. Архитектура мультисервисной мобильной сети

Архитектура гибридной RoF сети включает провайдеров предоставляемых услуг, центральную станцию (ЦС), волоконно-оптические линии связи, БС и МТ [1]. Варианты выбора топологии, а также метода формирования и передачи сигналов определяют особенности архитектуры сети в целом. В работе [8] соединение БС с ЦС происходит по топологии "звезда". Несколько сот предложено объединять в виртуальные зоны для искусственного увеличения соты. Управление эстафетной передачи между БС осуществляется в ЦС. Движение абонента ограничивается скоростью 100 км/ч. В исследовании [6] применяется также топология "звезда" и предложен метод движущихся сот: нужные услуги виртуально перемещаются с МТ. Синхронность движения сиг-

налов и МТ усложняет функции ЦС и ограничивает скорость до 130 км/ч.

Использование для радиодоступа миллиметрового диапазона волн ведет к увеличению требуемого числа БС из-за значительного затухания сигнала в атмосфере и осадках, что обуславливает удорожание сети, если не предпринять дополнительные меры. Для удешевления сети предлагаются следующие решения в архитектуре: упрощение функциональности БС и выбор оптимальной топологии их связи с ЦС для уменьшения длины используемого оптоволоконного кабеля (рис. 1) [1].

Затребованные сервисы поступают от провайдеров в ЦС, в которой происходит мультиплексирование услуг всех абонентов сети (в текущий момент времени) в один поток. Суммарный сигнал после оптического модулятора передается на все БС по топологии "шина". К БС подходят 2 оптических волокна: одно с информационным сигналом, второе с опорным лучом света. Разность длин волн определяет несущую частоту в миллиметровом диапазоне. На БС фотодиод преобразует разность двух световых сигналов в электромагнитное излучение. БС получает все услуги сети и передает их в своей соте, которые принимает МТ (полоса несколько ГГц) и выбирает свою нужную услугу. Архитектура упрощает функции БС и уменьшает длину оптоволоконного кабеля в N раз (N – количество БС) по сравнению с оптоволоконной распределительной сетью, выполненной по топологии "звезда".

Однако такая архитектура порождает новые проблемы, связанные с формированием сигнала в ЦС и выделением нужной услуги в МТ. Упрощенная модель сети представлена на рис. 2.

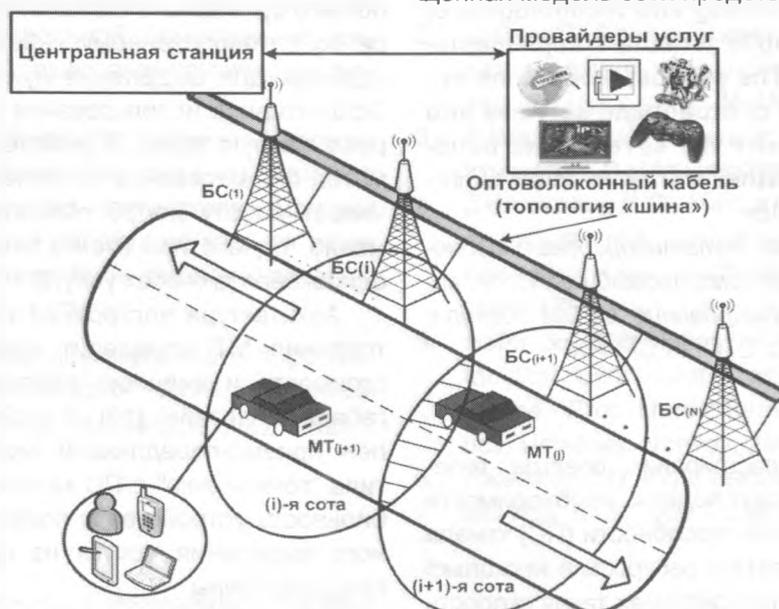


Рис. 1. Архитектура мобильной гибридной сети

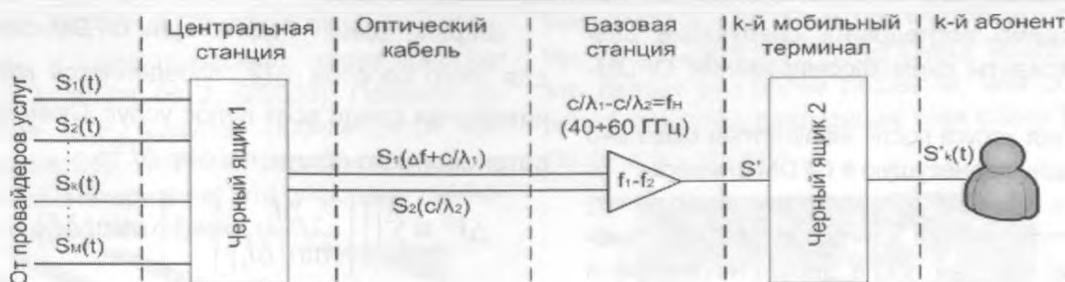


Рис. 2. Упрощенная модель сети

Для простоты описания модели предположим, что каждый из M пользователей сети может заказать одну услугу. Тогда k -му абоненту принадлежит k -я услуга. Все M услуг от провайдеров поступают в ЦС. Здесь формируется общий поток, занимающий полосу Δf :

$$\Delta f = \sum_{k=1}^M \Delta f_k \quad (1)$$

где Δf_k – полоса, которая отводится k -ой услуге. Световой луч лазера с длиной волны λ_1 модулируется информационным сигналом и передается в первое волокно, по которому распространяется сигнал, несущий информацию о всех услугах, $S_1(\Delta f + c/\lambda_1)$, где c – скорость света. По второму волокну передается монохроматический световой луч S_2 с длиной волны λ_2 . Он образуется путем преобразования из первого луча до его модуляции. При таком формировании лучей нестабильность их частот, обусловленная внешними воздействиями, такими как температура, питание лазера и др., не будет переноситься на несущее колебание в миллиметровом диапазоне. Длины волн в волокнах должны удовлетворять равенству:

$$f_n = f_1 - f_2 = \frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2} \quad (2)$$

где f_n – несущее колебание в миллиметровом диапазоне (40+60 ГГц). K -тый МТ принимает искаженный сигнал S' , который равен сумме сигналов, принятых от ближайших БС.

Обработка сигнала S' в k -ом МТ позволяет получить свою k -ую услугу S'_k . Приемник МТ имеет супергетеродинную архитектуру. Антенна принимает сигнал S' , полосовой фильтр выделяет из всего радиоспектра полосу (1), малошумящий усилитель повышает уровень сигнала. Цепочка из P преобразований смещает сигнал с несущей частоты (2) на частоту, на которой осуществимо аналого-цифровое преобразование, OFDM демультиплексирование и цифровая обработка. После этих операций k -я услуга предоставляется пользователю. Основная

задача системного проектирования МТ – выбор числа P , параметров составных частей (смесителя, полосового фильтра и гетеродина) каждого преобразования и способа выделения нужной услуги после OFDM приемника (формирование групп услуг).

Целевая функция обработки сигнала может быть представлена разницей между параметрами сигналов услуги провайдера и услуги, доставленной абоненту МТ, устремленной к минимуму:

$$\Phi_k = S_k(t) - S'_k(t) \rightarrow \min \quad (3)$$

Параметры, по которым оценивается качество услуги, и критерий должны быть заложены в алгоритм обработки сигнала.

2. Формирование сигнала в мультисервисной сети

Для обеспечения высокой ПС системы необходимо использовать схему расширения спектра со многими несущими, которая базируется на технологии OFDM [12]. Она применяется для увеличения информационной скорости передачи путем одновременного использования множества частотных поддиапазонов.

Внимание к OFDM привлекла успешная реализация этой технологии в различных приложениях (DVB, DAB). Однако услуги, которые приводятся в описании таких систем, ограничены по скорости до 2 Мбит/с и по количеству до нескольких десятков [13].

Используя метод OFDM, можно довести количество передаваемых услуг до сотен либо даже тысяч, каждая из которых требует ресурс сети, равный 3–12 Мбит/с. Общая ПС сети, например, для 2000 услуг, составит 6–24 Гбит/с. Тогда при модуляции КАМ-64 полоса частот спектра всех услуг составит 1–4 ГГц, а при КАМ-256 – 0,75–3 ГГц. Постановка задачи заключается в нахождении такой схемы формирования OFDM-сигнала, при которой будет обеспечена высокая производительность передачи услуг при качественном и дешевом способе выделения приемником МТ одной услуги из общего множества услуг.

Необходимо исследовать следующие различные варианты схем формирования OFDM-сигнала:

А. Каждая услуга после модулятора отдельно занимает одну поднесущую в OFDM-символе.

Б. Весь трафик (совокупность всех услуг) представляется в виде единой последовательности пакетов, которая после демультиплексора и модулятора заполняет одновременно весь OFDM-символ без сортировки услуг по поднесущим.

В. В OFDM-символе формируются "логические каналы" из конечного числа поднесущих, которые наполняются одной услугой, требующей повышенной производительности сети.

Г. В OFDM-символе формируются "зоны" из конечного числа поднесущих, которые наполняются ограниченным числом услуг.

В случаях "Б" и "Г" возможен вариант, что в одной поднесущей окажутся разные услуги. Это усложнит выделение нужной услуги в МТ.

Для варианта "А" на каждую услугу выделяется одна поднесущая OFDM-символа. Сигналы услуг, занимающие после модуляции в частотной области разную полосу частот (Δf_i), поступают в формирователь OFDM-сигнала, ширина одной поднесущей которого Δf_0^A определяется с учетом требования ортогональности поднесущих как максимальная среди всех полос услуг. Это приведет к нерациональному использованию частотного ресурса, ведь для других услуг, занимающих меньшую полосу, часть полосы будет "простаивать". Для этого варианта значение Δf^A (1) вычисляется как:

$$\Delta f^A = M \cdot \max\{\Delta f_i\}. \quad (4)$$

Для варианта "В" группировать несущие можно в зависимости от того объема, который необходимо передать в данной услуге (при этом чем выше качество услуги, тем больше поднесущих необходимо задействовать). Для повышения производительности системы необходимо использовать адаптивное распределение поднесущих для услуг. Это означает, что с течением времени может изменяться количество поднесущих, выделенных под каждую услугу. Для реализации данного варианта можно выделить условную услугу, которая займет одну поднесущую, и измерять все услуги в количестве условных услуг. Целевая функция задачи минимизирует полосу для условной услуги, при этом задача целочисленная (каждая услуга делится на целое число условных услуг). Задача решается за W итераций, где W – все возможные значения ширины поднесущей для условной услуги.

Ширина одной поднесущей OFDM-сигнала для этого способа Δf_0^B определяется как минимальная среди всех полос услуг. Суммарный поток занимает общую полосу Δf^B :

$$\Delta f^B = \sum_{i=1}^M \left(\left\lceil \frac{\Delta f_i}{\min\{\Delta f_i\}} \right\rceil + 1 \right) \cdot \min\{\Delta f_i\} - (q+1) \cdot \min\{\Delta f_i\} \quad (5)$$

где $[X]$ – целая часть от значения X , q – количество услуг, полоса которых кратна $\min\{\Delta f_i\}$.

При малом динамическом диапазоне полос услуг способ "А" имеет преимущество перед способом "В". Во всех остальных случаях его применение нецелесообразно и увеличивает полосу суммарного потока.

2. Реализация мобильного терминала пользователя

Можно выделить два базовых принципа, на основе которых строятся пользовательские терминалы: система в чипе (System on Chip, SoC) и система как модуль (System on Package, SoP). В работе [14] рассмотрены физические особенности этих подходов, допускающие использование миллиметрового диапазона волн. SoC является полнофункциональным многослойным решением с интеграцией пассивных и цифровых элементов в виде чипа. Архитектура SoP включает интеграцию в одном модуле высокоскоростных цифровых, радиочастотных компонентов на базе компактной многослойной подложки, которая в архитектуре SoP выполняет роль не только разделителя слоев, но и является средой для распространения электромагнитных волн между включенными в структуру компонентами [15]. Этот фактор делает особенно важным выбор материала подложки, от параметров которой зависят характеристики распространения электромагнитных волн в структуре.

Несмотря на такие преимущества технологии низкотемпературной керамики (Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC), как низкая стоимость, миниатюризация и высокая интеграция элементов, технология имеет свои трудности в реализации [16].

LCP (Liquid Crystal Polymer) – технология на органических подложках "жидкокристаллический полимер" (рис. 3).

Технология LCP, по сравнению с LTCC, дает возможность более высокой интеграции элементов SoP, а также наилучшим образом подходит для использования в диапазо-

не 30...110 ГГц [17]. LCP имеет отличные механические и электрические характеристики ($\epsilon_r=2,9...3,2$, $\tan\delta=0,0012...0,0063$). Процесс изготовления LCP модулей производится при температуре 240...340°C в зависимости от используемых материалов, что упрощает технологию и уменьшает стоимость МТ.

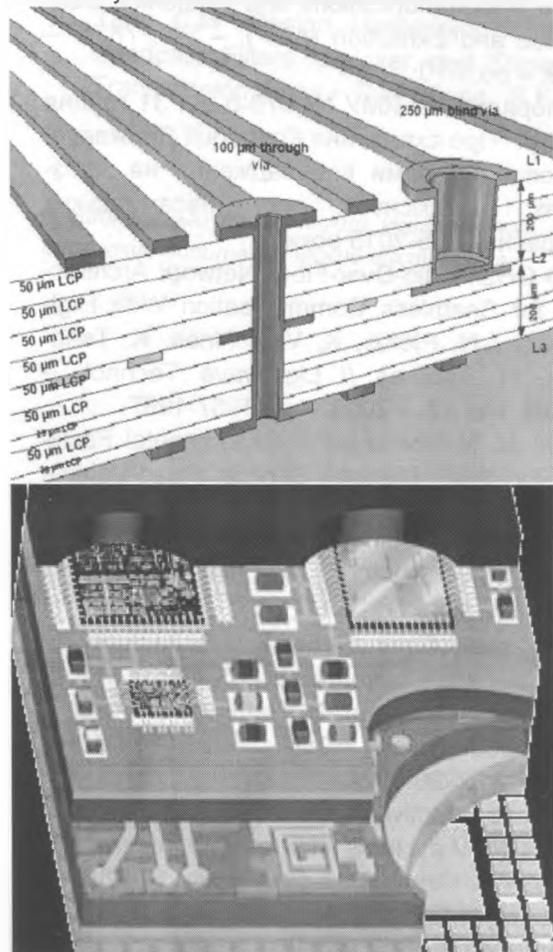


Рис. 3. Многослойная структура модуля LCP

Еще один тип диэлектрического материала – RXP. По сравнению с LCP, RXP используется для еще более компактных реализаций модулей SoP на частотах до 110 ГГц [18]. Один слой модуля может быть реализован толщиной не более 0,2 мм.

Процесс производства выполняется при

температуре ~220°C, и совместим со стандартом печатных плат (Printed Circuit Board, PCB), что делает его более дешевым, чем LCP. На рис. 4 показана реализация трех слоев RXP, а также всего модуля.



Рис. 4. Реализация слоев в технологии RXP и многослойный модуль

Сравнение рассмотренных технологий отражено в табл. 1.

Таким образом, для построения МТ абонента мультисервисной сети доступа в миллиметровом диапазоне волн является возможным использование технологий LCP и RXP, ценовой диапазон которых в результате одинаковых температур процессов и аналогичных характеристик материалов практически равен. Применение LTCC в этом диапазоне частот технически и экономически неоправданно.

Задача построения мультисервисной сети доступа к МТ абонента, движущегося с высокой скоростью, является комплексной. Она может

Таблица 1. Сравнение технологий изготовления МТ

Тех-я	ϵ_r	$\tan\delta \cdot 10^{-4}$	F, ГГц	Интеграция элементов	t процесса °С	Стоимость изготовления
LTCC	5,6-9,5	12-63	< 12	Достаточно высокая	~ 900	Средняя; оправдана при серийном производстве
LCP	2,9-3,2	20-45	30-110	Высокая	~ 240-340	Низкая
RXP	2,9-3,5	37-60	1-110	Наивысшая	~ 220	Низкая

быть определена тройкой множеств [10]:

$$Z \sim (A_i, B_i, P_i), \quad (6)$$

где Z – абстрактное обозначение задачи, A_i – входная информация, B_i – выходная информация, P_i – способ (алгоритм) решения задачи.

A_i задается полосой суммарного сигнала (1), частотой несущего колебания (2), скоростью движения МТ. B_i зависит от принципа построения сети, варианта схем формирования OFDM-символа, структуры МТ (количества и параметров каждого преобразования, способа селективного выделения услуги и т.п.). В качестве P_i может выступать критерий Φ_k (3).

Решение части задачи (6) предложено в данной статье.

Выводы

Основными результатами работы являются следующие:

- предложена модель архитектуры мобильной мультисервисной гибридной сети, выбран критерий оценки ее работы;
- предложены способы формирования OFDM-сигнала, позволяющие передавать все услуги в одном потоке, для каждого случая выведены выражения полосы частот, занимаемые сигналом;
- проанализирован принцип построения МТ, обосновано использование технологий LCP и RXP для изготовления МТ.

Дальнейшая работа будет проводиться в следующих направлениях: определение границ применения каждого из предложенных способов формирования сигнала, нахождение числа и параметров преобразования в приемнике, реализация МТ с помощью выбранных технологий, определение способов цифровой обработки сигналов в МТ.

Литература

1. Интерактивная гетерогенная телекоммуникационная система 4G с беспроводным доступом в миллиметровом диапазоне для предоставления мультимедийных услуг мобильным абонентам / М. Е. Ильченко, К. С. Сундучков, С. Э. Волков и др. // Зв'язок. – 2008. – №7-8. – С.28-32.
2. Yong S.K. An Overview of Multigigabit Wireless through Millimeter Wave Technology: Potentials and Technical Challenges / S.K. Yong, C. Chong // EURASIP Jour. on Wir. Comm. and Net. – Vol. 1. – 2007. – pp.50-59.
3. 4G as a Next Generation Wireless Network / A. H. Khan, M. A. Qadeer, J. A. Ansari, S. Waheed // Future Comp. and Comm., IC FCC. – 2009. – pp.334-338.
4. Ng'oma A. Radio-over-Fiber Systems for Multi-Gbps Wireless Communication / A. Ng'oma, M. Sauer // Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP). – Vol. 7632. – 2009. – pp.1-10.
5. Розпорядження КМУ № 979-р від 31 грудня 2004 р. "Про схвалення Концепції Державної цільової програми впровадження на залізницях швидкісного руху пасажирських поїздів на 2005-2015 роки".
6. A 60 GHz Radio-Over-Fiber Network Architecture for Seamless Communication With High Mobility / N. Pleros, K. Vyrsoinos, K. Tsagkaris, N. Tselikas // Lightwave Technol. – Vol. 27, No. 12. – 2009. – pp.1957-1967.
7. Fujise M. Millimeter-wave Experimental Facilities for ROF Multiple Service Road-Vehicle Communications / M. Fujise, K. Sato, H. Harada // Int. Symp. on An. and Prop. (ISAP2000), ACROS Fukuoka, Japan. – 2000. – pp.329-332.
8. Radio over Fiber Network Architecture for Road Vehicle Communication Systems / H. B. Kim, M. Emmelmann, B. Rathke, A. Wolisz // VTC 2005-Spring, 2005 IEEE 61st. – Vol. 5. – p.2920-2924.
9. Ozbek B. Adaptive resource allocation for multicast OFDM systems with multiple transmit antennas / B. Ozbek, D. L. Ruyet and H. Khiari // Proc. of IEEE ICC. – 2006. – Vol. 10. – pp.4409-4414.
10. Ящук О.С. Системний підхід до моделювання НВЧ пристроїв / О.С. Ящук, Б.М. Шелковников // Електроніка і зв'язок (тематичний випуск "Електроніка і нанотехнології"). – №5(58). – 2010. – С.222-226.
11. LTCC SoP RF Transceiver Module for 60 GHz Wireless Gigabit Ethernet Communication System / A. Ariffin et al. // Jour. of Comm. and Comp. – Vol. 7, No. 6 (67). – 2010. – pp.63-70.
12. Yao P. Advanced OFDM Systems for Modern Communication Networks. / Proceed. of the Second Symp. Int. Comp. Sc. and Computat. Techn. (ISCST'09). – 2009. – pp.475-478.
13. Khalidin Z. Performance of Orthogonal Frequency Division Multiplexing System Based on Mobile Velocity and Subcarrier // Z.B. Khalidin, H.J. Taha. – Journal of Computer Science. – Vol. 6(2). – 2010. – pp.194-198.
14. Чмиль В.М. Техніка і технологія систем миллиметрових волн / В.М. Чмиль.

- К.С. Сундучков, И.К. Сундучков // ТКЭА. - №4. – 2003. – С.6-14.
15. 60 GHz Single-Chip Front-End MMICs and Systems for Multi-Gb/s Wireless Communication / S.E.Gunnarsson, C.Kärnfelt, H.Zirath et al. // IEEE Jour. of Solid-State Circ. – Vol. 42, No. 5. – 2007. – p.1143-1157.
 16. Tang C.W. Design Methodologies of LTCC Bandpass Filters, Diplexer, and Triplexer with Transmission Zeros / C.W. Tang, S.F. You // IEEE Trans. Micr. Theory and Tech. – Vol. 54. – 2006. – pp.717-723.
 17. Design and fabrication of integrated RF modules in liquid crystalline polymer (LCP) substrates / M. Swaminathan, A. Bavis, W. Yun et al. // IEEE Indust. Elect. Society Conf. – 2005. – p.6.
 18. Characterization of next generation thin low-k and low-loss organic dielectrics from 1 to 110 GHz / S. Hwang, S. Min, M. Swaminathan et al. // IEEE Trans. Adv. Packag. – 2010. – p.10-15.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*