

Синтезатор прямого цифрового синтеза в микроволновой спектроскопии

Е. А. Алексеев, В. В. Захаренко

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: alekseev@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2007 г.

Приведены результаты исследования возможности применения синтезатора прямого цифрового синтеза в качестве опорного источника в спектрометре миллиметрового диапазона. Показано, что при комбинации прямого цифрового синтеза и узкополосной фазовой автоподстройки частоты можно получать высокую кратность умножения частоты (вплоть до 600) выходного сигнала синтезатора прямого цифрового синтеза без влияния его побочных спектральных компонент. Разработанный синтезатор успешно применен в спектрометре для исследования вращательных спектров молекул. Спектральная чистота несущей оценивалась по записям молекулярных спектров и оказалась не хуже, чем при использовании прямого аналогового синтеза, при этом значительно уменьшились размеры, масса и энергопотребление синтезатора.

Введение

Современную экспериментальную микроволновую спектроскопию уже невозможно представить без применения новейших синтезаторов частоты. Спектрометры всех ведущих лабораторий мира построены на основе синтезаторов частоты. Здесь можно упомянуть и лабораторию в Кельнском университете (Германия) [1, 2], и Лабораторию физики лазеров, атомов и молекул (г. Лилль, Франция) [3, 4], Департамент химии в Университете г. Болоньи (Италия) [3, 5], лабораторию в Институте физики (г. Варшава, Польша) [6], лабораторию в Химико-технологическом институте (г. Прага, Чехия) [7] и т. д. В спектрометрах всех перечисленных лабораторий используются синтезаторы частоты, причем синтезаторы на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Для получения высокого частотного разрешения такие син-

тезаторы строятся с применением делителей с дробным коэффициентом деления частоты при сравнительно низкой частоте сравнения ФАПЧ. Для синтезаторов такого рода характерен относительно высокий уровень фазовых шумов и побочных спектральных составляющих [8].

Следует отметить, что в настоящее время наблюдается бурное развитие в области прямого цифрового синтеза частоты. Этот метод синтеза частоты становится все более и более популярным. Принципы прямого цифрового синтеза частот предложены еще в 1971 г. [9], однако только в последнее десятилетие, благодаря серьезным успехам в области микроэлектроники, они были успешно реализованы на практике [10-14]. Появление дешевых микросхем синтезаторов прямого цифрового синтеза и удобных средств разработки делает их сегодня привлекательными для различных сфер применения.

Синтезаторы прямого цифрового синтеза (в англоязычной литературе – direct digital synthesis – DDS) уникальны своей цифровой определенностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени известны с высокой точностью и легко управляются. DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению. Их высокие технические характеристики стали причиной того, что в последнее время в ряде применений DDS вытесняют традиционные аналоговые синтезаторы частот.

Частотное разрешение DDS составляет $10^{-1} \div 10^{-6}$ Гц при выходной частоте до нескольких сотен мегагерц. Такое разрешение недостижимо для других методов синтеза. Другой характерной особенностью DDS является очень высокая скорость перехода на другую частоту, которая ограничена только быстродействием цифрового управляющего интерфейса. При этом, например, синтезаторы на основе ФАПЧ используют обратную связь и фильтрацию сигнала ошибки, что существенно замедляет процесс переключения частоты. Серьезное преимущество DDS заключается в том, что все перестройки по частоте происходят без разрыва фазы выходного сигнала. Архитектура этих синтезаторов позволяет осуществлять модуляцию различных видов.

Если принять во внимание перечисленные выше достоинства синтезаторов прямого цифрового синтеза, то применение таких приборов для синтеза частот в миллиметровом диапазоне длин волн выглядит весьма заманчивым. Однако, несмотря на все достоинства, DDS пока не нашли применения в спектроскопии в качестве опорных источников. По нашему мнению, основная причина этого – их недостатки. Наиболее существенными из этих недостатков являются следующие:

- в настоящее время максимальное значение основной рабочей частоты DDS не превышает 400 МГц [14, 15];
- отдельные побочные спектральные составляющие на выходе DDS могут быть значительными по сравнению со спектральными составляющими синтезаторов других типов [10].

Поскольку процесс синтеза частот в микроволновом диапазоне в настоящее время неразрывно связан с умножением частоты, наиболее серьезным препятствием на этом пути оказывается наличие в спектре опорных синтезаторов побочных спектральных компонент со значительной амплитудой.

Основной целью настоящей работы является поиск такого способа умножения частоты синтезаторов прямого цифрового синтеза, который не повышает уровень побочных компонент в спектре генерации. Дополнительной целью исследования была модернизация спектрометра миллиметрового диапазона Радиоастрономического института НАНУ.

1. Особенности использования синтезатора прямого цифрового синтеза в системах с умножением частоты

Синтез частот в миллиметровом диапазоне длин волн осуществляется, как правило, путем умножения частоты выходного сигнала синтезаторов диапазона $100 \div 10000$ МГц [16]. При таком подходе кратность умножения частоты опорного синтезатора может достигать нескольких сотен и даже тысяч. Именно поэтому особые требования предъявляются к первичному синтезатору, поскольку именно его качеством в конечном счете и будет определяться чистота спектра выходного сигнала в миллиметровом диапазоне.

Наиболее серьезным недостатком синтезаторов прямого цифрового синтеза частоты является наличие побочных спектральных компонент, связанных с особенностями их внутренней архитектуры. Вот почему при использовании DDS в системах с высокой кратностью умножения частоты как правило возникают серьезные проблемы [10] – результирующий спектр содержит большое количество паразитных составляющих с большой амплитудой.

Мы решили проверить возможность применения синтезаторов частоты прямого цифрового синтеза в системах с высокой кратностью умножения частоты на основе срав-

нительно недорогой микросхемы AD9851. Характерные записи спектров генерации синтезатора прямого цифрового синтеза AD9851 приведены на рис. 1 [17]. Как следует из рис. 1, б и из [17], уровень побочных спектральных компонент в полосе частот ± 0.05 МГц от несущей не превосходит уровня -85 дБ. При этом в полном рабочем диапазоне $0 \div 72$ МГц (см. рис. 1, а) уровень побочных спектральных компонент достигает $-60 \div -42$ дБ [17]. Вот почему для сохранения высокой спектральной чистоты необходимо применять узкополосную адаптивную фильтрацию. Такая филь-

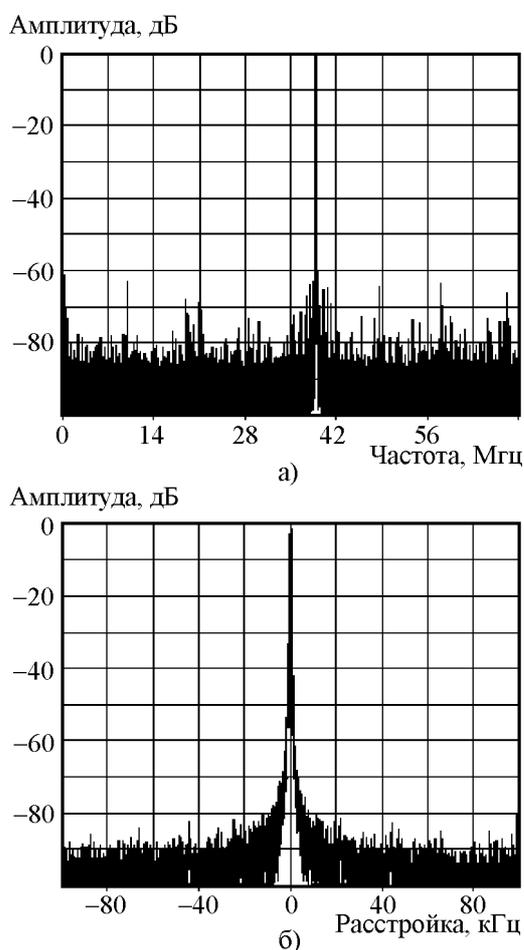


Рис. 1. Спектр генерации синтезатора прямого цифрового синтеза AD9851 в широкой (а) и узкой (б) полосах [17] при частоте выходного сигнала 40.1 МГц

трация может быть обеспечена при помощи узкополосной системы ФАПЧ (см. ниже в разделе 2).

Прямое умножение частоты, например, от 40 до 240000 МГц (т. е. в 6000 раз) приведет к росту уровня побочных компонент на 75 дБ (и это при условии применения относительно узкополосной адаптивной фильтрации, ограничивающей полосу частот вблизи основной компоненты значениями не более ± 0.05 МГц). При этом отношение сигнал/помеха станет не более, чем 10 дБ. Вот почему необходимо понизить кратность умножения частоты как минимум на порядок.

Как известно [10], в выходном спектре синтезатора прямого цифрового синтеза с опорной частотой f_{ref} помимо основного сигнала с частотой f_{out} содержатся также дополнительные компоненты с частотами $nf_{\text{ref}} \pm f_{\text{out}}$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Распределение амплитуд этих компонент представлено на рис. 2 для $f_{\text{out}} = 50$ МГц и $f_{\text{ref}} = 180$ МГц (при использовании AD9851). В целом такой синтезатор обеспечивает работу в диапазоне $0 \div 72$ МГц. Для применения в спектрометре нам желательно сместить его рабочий диапазон в область порядка 400 МГц (см. ниже раздел 2). Это означает, что следует использовать компоненту $2f_{\text{ref}} + f_{\text{out}}$. Прежде всего мы попытались выделить ее фильтрами (см. рис. 2) и усилить. Однако

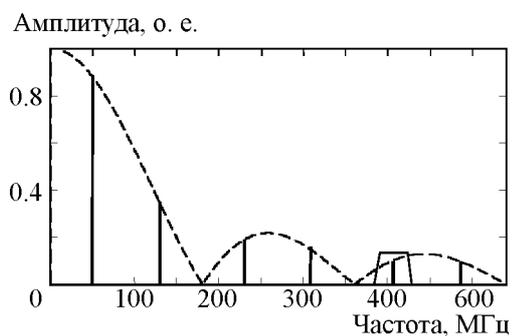


Рис. 2. Спектр генерации идеального синтезатора прямого цифрового синтеза при частоте выходного сигнала 50 МГц (тактовая частота равна 180 МГц)

наша попытка оказалась неудачной, поскольку на практике уровень компоненты $2f_{ref} + f_{out}$ из-за неидеальности цифроаналогового преобразователя AD9851 оказался ниже теоретического примерно на 20 дБ. Это привело к соответствующему ухудшению отношения сигнал/шум и в конечном счете к невозможности получить приемлемое качество сигнала после умножения частоты.

Получить спектральную компоненту $2f_{ref} + f_{out}$ можно и другим способом, например, при использовании преобразователя с повышением частоты. Функциональная схема такого преобразователя на основе синтезатора AD9851 приведена на рис. 3. Суть решения состоит в следующем: на смеситель подается выходной сигнал DDS и синтезированный сигнал с частотой 360 МГц, а полосовым фильтром выделяется суммарная компонента результата пре-

образования частоты (385 ÷ 430 МГц). В качестве опорного сигнала для DDS использовался сигнал с частотой 180 МГц, который получался при делении на 2 частоты сигнала 360 МГц.

Применение преобразователя с повышением частоты оказалось успешным, поэтому все приведенные ниже результаты получены именно с использованием этого опорного синтезатора.

2. Микроволновый спектрометр и методы контроля чистоты спектра

Основой спектрометра РИ НАНУ [18, 19] также является синтезатор частоты. В течение многих лет этот спектрометр успешно использовался для исследований спектров молекул (см., например, [20-22]), подвергаясь неоднократной модернизации. Ниже мы приведем описание современной структуры

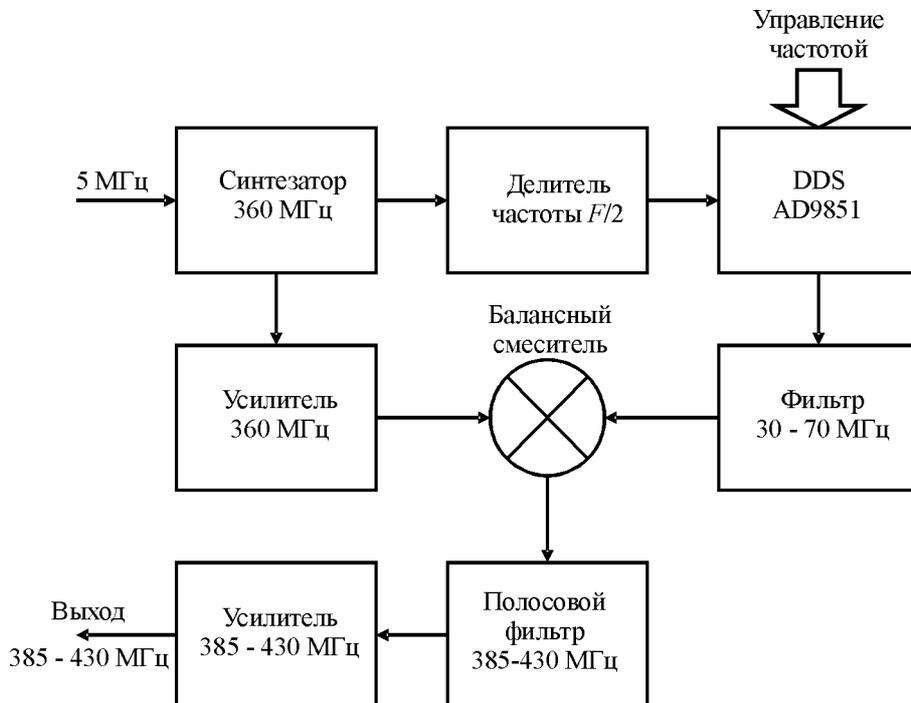


Рис. 3. Функциональная схема преобразователя частоты вверх

нашего спектрометра, а также результаты его последней модернизации.

Упрощенная функциональная схема синтезатора частоты (в составе спектрометра) приведена на рис. 4. Синтез частот в миллиметровом диапазоне длин волн осуществляется при помощи двухступенчатого умножения частоты промышленного синтезатора диапазона 390÷400 МГц в двух кольцах ФАПЧ. Для повышения отношения сигнал/шум при последующем умножении частоты, а также для эффективной фильтрации фазовых шумов опорного синтезатора на первой ступени умножения используется клистронный генератор диапазона 3400÷5200 МГц. Максимально возможная широкополосность спектрометра достигается при использовании на второй ступени умножения частоты ряда сменных ламп обратной волны (ЛОВ). Выбирая различные комбинации кратностей умножения в обоих кольцах ФАПЧ, удавалось синтезировать частоты практически во всем диапазоне от 49000 до 149000 МГц.

Применение удвоителя частоты позволяет расширить диапазон рабочих частот до 250000 МГц. Для достижения максимальной точности измерений все опорные сигналы синхронизированы по рубидиевому стандарту частоты.

Спектрометр (см. рис. 4) построен по так называемой “классической схеме” абсорбционных спектрометров: излучение синтезатора частоты диапазона 49000÷149000 МГц (или же до 250000 МГц при использовании удвоителя частоты) пропускается через поглощающую кювету, содержащую исследуемый газ, и детектируется приемной системой. Детектором излучения служит неохлаждаемый диод с барьером Шоттки. Выходной сигнал детектора усиливается малошумящим усилителем и, после аналого-цифрового преобразования (АЦП), регистрируется компьютером. Запись спектров поглощения молекул осуществляется следующим образом: в заданном диапазоне частота синтезатора изменяется управляющим компьютером с заданным шагом,

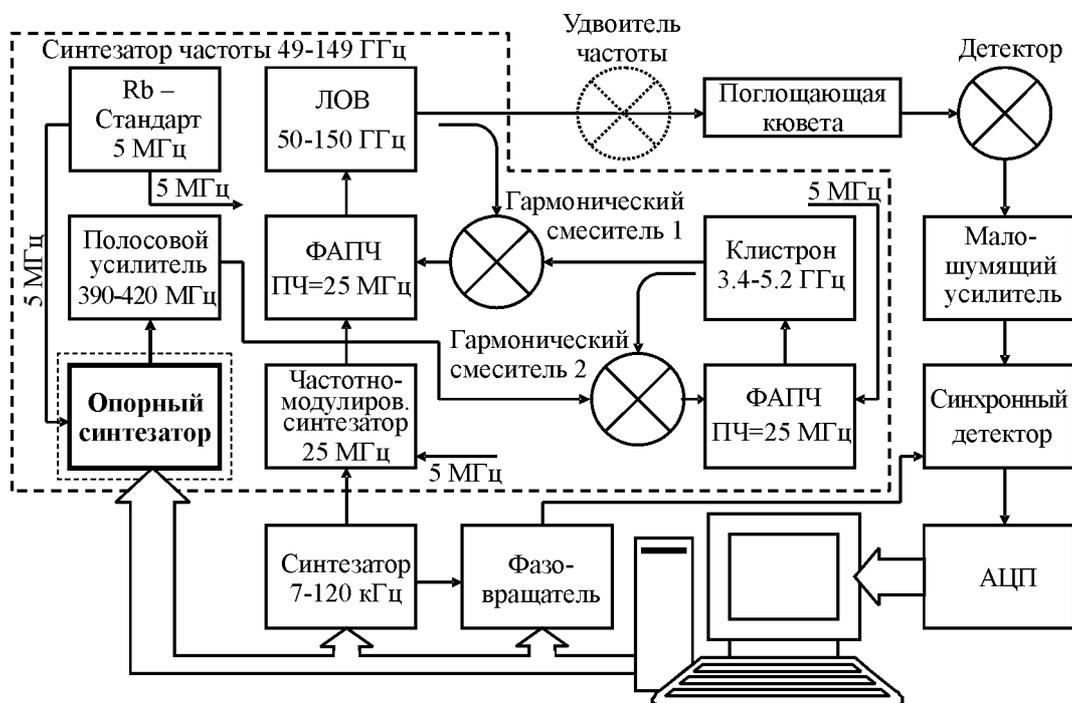


Рис. 4. Функциональная схема спектрометра миллиметрового диапазона

при этом в каждой точке регистрируются изменения уровня сигнала, прошедшего через поглощающую кювету. При записи спектров молекул выходное излучение синтезатора модулировано по частоте, а в приемной системе используется синхронное детектирование, поэтому линии поглощения регистрируются в виде первой производной по частоте от их формы.

Серьезным недостатком нашего синтезатора является наличие так называемых “мертвых зон” – сравнительно небольших участков диапазона, в которых невозможен синтез частот. Появление этих “мертвых зон” вызвано узким диапазоном рабочих частот опорного синтезатора: $390 \div 400$ МГц. В качестве этого синтезатора мы применяли модифицированный промышленный синтезатор прямого аналогового синтеза частоты Ч6-31. Предпринимавшиеся ранее попытки заменить его прибором с более широким диапазоном рабочих частот (как правило на основе ФАПЧ) всякий раз завершались неудачей, поскольку выяснялось, что спектральная чистота нового синтезатора намного хуже, чем исходного. Построенный в рамках настоящей работы синтезатор (см. рис. 3) предназначен для замены применявшегося ранее опорного синтезатора (см. рис. 4, опорный синтезатор выделен жирными линиями). Следует отметить, что благодаря низкому уровню фазовых шумов клистрона, именно его ФАПЧ с полосой пропускания около $1 \div 2$ кГц используется в качестве адаптивного узкополосного фильтра. Такое решение позволило нам сохранить чистоту спектра генерации при высокой кратности умножения частоты, которая на максимальной рабочей частоте спектрометра (около 250000 МГц) достигает ~ 600 .

При разработке синтезаторов частоты немаловажным вопросом является метод контроля чистоты спектра построенного прибора. Поскольку промышленные анализаторы спектра, позволяющие проводить измерения уровня фазовых шумов, являются весьма дорогостоящим и малодоступным оборудованием, нам пришлось вы-

работать свои методы сравнения качества опорных синтезаторов. Заметим, что наш синтезатор частоты является составной частью спектрометра для исследования молекулярных спектров. По этой причине для контроля качества спектра генерации мы решили использовать записи спектров поглощения молекул: наличие регулярных побочных компонент в спектре синтезатора приведет к регистрации ложных линий, а при нерегулярной природе этих компонент мы заметим ухудшение отношения сигнал/шум.

3. Результаты и обсуждение

Для того чтобы сравнить спектральную чистоту опорных синтезаторов мы записали участки спектра молекулы CF_3CH_3 в диапазоне частот около 124 ГГц (рис. 5) и 228 ГГц (рис. 6). На каждом рисунке представлено по две записи, одна из которых

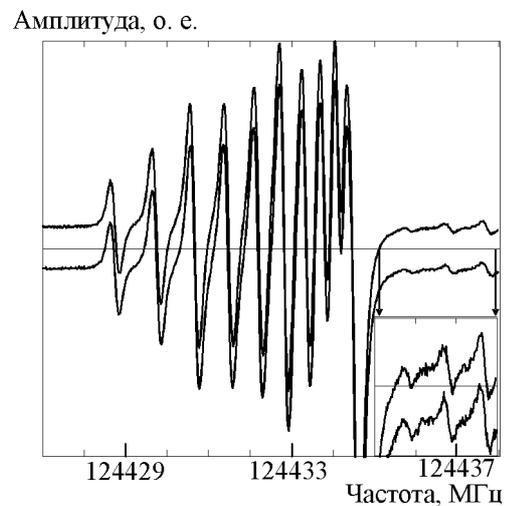


Рис. 5. Записи участка спектра молекулы CF_3CH_3 на частотах около 124 ГГц, полученные при использовании нового опорного синтезатора частоты на основе DDS (верхняя запись) и со старым опорным синтезатором (нижняя запись). Для наглядности записи разнесены по вертикали. Для оценки шумов в нижней части рисунка приведены фрагменты записей, увеличенные в 6 раз по амплитуде

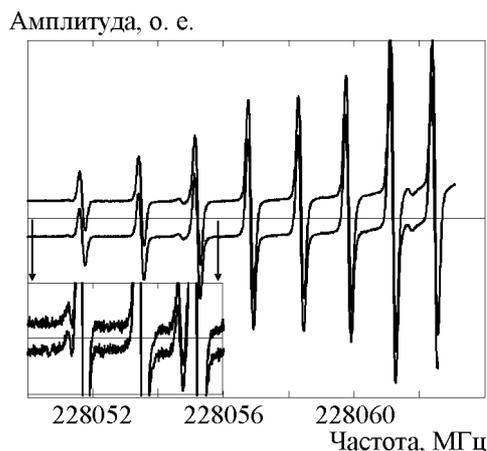


Рис. 6. Записи участка спектра молекулы CF_3CH_3 на частотах около 228 ГГц, полученные при использовании нового опорного синтезатора частоты на основе DDS (верхняя запись) и со старым опорным синтезатором (нижняя запись). Для наглядности записи разнесены по вертикали. Для оценки шумов в нижней части рисунка приведен фрагмент, увеличенный в 15 раз по амплитуде

получена с использованием старого аналогового синтезатора (нижние записи), вторая – с синтезатором на основе прямого цифрового синтеза (верхние записи). Как следует из сравнения этих записей, синтезатор прямого цифрового синтеза может использоваться в нашем спектрометре без какого бы то ни было ухудшения отношения сигнал/шум. Результаты измерения частот линий поглощения также совпадают. На рис. 6 мы привели увеличенный в 15 раз по амплитуде фрагмент записи, на котором можно сравнить уровень шума для обоих опорных синтезаторов. Детальный анализ шумовой дорожки (по несколько сотен точек в различных участках диапазона) показывает, что дисперсия шума для двух опорных синтезаторов различается не более чем на $\pm 10\%$. Таким образом, можно сделать вывод, что уровень фазовых шумов нового синтезатора по крайней мере не хуже, чем шумы старого. Полученные результаты означают, что синтезатор прямого цифрового синтеза может быть эффективно исполь-

зован в микроволновой спектроскопии при условии применения узкополосной адаптивной фильтрации.

Благодаря более широкому диапазону частот ($385 \div 430$ МГц вместо $390 \div 400$ МГц), применение синтезатора прямого цифрового синтеза позволило полностью устранить “мертвые зоны”, т. е. участки диапазона спектрометра, синтез частоты в которых ранее был невозможен. Отметим также, что при этом значительно уменьшились размеры, масса и энергопотребление спектрометра.

В перспективе мы предполагаем применить микросхему более совершенного синтезатора. Такая замена даст некоторое улучшение спектральной чистоты опорного синтезатора и, что не менее важно, повысит частотное разрешение на 2–3 порядка. Эти преимущества проявятся при дальнейшем расширении диапазона рабочих частот спектрометра в субмиллиметровый диапазон.

Работа выполнена при поддержке гранта УНТЦ (контракт №2132).

Литература

1. M. Šimečková, Š. Urban, U. Fuchs, G. Winnewisser, I. Morino, K. M. T. Yamada. Ground state spectrum of methylcyanide // J. Mol. Spectrosc. – 2004. – Vol. 226. – P. 123-136.
2. S. Brünken, U. Fuchs, F. Lewen, Š. Urban, T. Giesen, G. Winnewisser et al. Sub-Doppler and Doppler spectroscopy of DCN isotopomers in the terahertz region: ground and first excited bending states $(v_1 v_2 v_3) = (0 1^{ef} 0)$ // J. Mol. Spectrosc. – 2004. – Vol. 225. – P. 152-161.
3. J.-M. Colmont, B. Bakri, F. Rohart, G. Włodarczak, J. Demaison, G. Cazzoli, L. Dore, C. Puzzarini. Intercomparison between ozone-broadening parameters retrieved from millimetre-wave measurements by using different techniques // J. Mol. Spectrosc. – 2005. – Vol. 231. – P. 171-187.
4. L. Nguyen, J. Buldyreva, J.-M. Colmont, F. Rohart, G. Włodarczak, E. A. Alekseev. Detailed profile analysis of millimetre 502 and 602 GHz $N_2O-N_2(O_2)$ lines at room temperature for collisional linewidth determination // Mol. Phys. – 2006. – Vol. 104, No. 16-17. – P. 2701-2710.

5. G. Cazzoli, L. Dore, C. Puzzarini, B. Bakri, J.-M. Colmont, F. Rohart, G. Wlodarczak. Experimental determination of air-broadening parameters of pure rotational transitions of HNO_3 : intercomparison of measurements by using different techniques // *J. Mol. Spectrosc.* – 2005. – Vol. 229. – P. 158-169.
6. I. Medvedev, M. Winnewisser, F. C. De Lucia, E. Herbst, E. Biaikowska-Jaworska, L. Pszczorowski, Z. Kisiel. The millimeter- and submillimeter-wave spectrum of the *trans-gauche* conformer of diethyl ether // *J. Mol. Spectrosc.* – 2004. – Vol. 228. – P. 314-328.
7. L. Strítešková, P. Kania, L. Kolesníková, J. Koubek, Š. Urban. Prague Stark millimeterwave spectrometer setup // *Proc. 19th International conference "High resolution molecular spectroscopy"*. – Prague. – 2006. – P. 99.
8. M. Curtin, P. O'Brien. Phase-Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters–Part 2 // *Analog dialogue.* – 1999. – Vol. 33, No. 5. – P. 13-17. Доступна по адресу: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/33-05/phase_locked/PLLs_2.pdf
9. J. Tierney, C. M. Rader, B. Gold. A digital frequency synthesizer // *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* – 1971. – AU-19. – P. 48-57.
10. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis, Analog Devices Inc. – http://www.analog.com/UploadedFiles/Tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf
11. J. M. P. Langlois and D. Al-Khalili. Phase to sinusoid amplitude conversion techniques for direct digital frequency synthesis // *IEE Proc. Circuits Devices Syst.* – 2004. – Vol. 151, No. 6. – P. 519-528.
12. В. Макаренко. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза // *Электронные компоненты и системы.* – 2004. – №1. – С. 3-7.
13. В. Макаренко. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза // *Электронные компоненты и системы.* – 2004. – №2. – С.13-18.
14. E. Murphy, C. Slattery. Direct Digital Synthesis (DDS) Controls Waveforms in Test, Measurement, and Communications // *Analog dialogue.* – 2005. – Vol. 39, No. 3. – P. 12 -15. Доступна по адресу: http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/39-08/dds_apps.pdf
15. http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD9858.pdf
16. В. Манасевич. Синтезаторы частоты. Теория и проектирование. – М.: Связь, 1979. – 384 с.
17. http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD9851.pdf
18. E. A. Alekseev. Automated high resolution Millimeter Wave Spectrometer // *Turkish Journal of Physics.* – 1995. – Vol. 19, No. 11. – P. 1457-1461.
19. E. A. Alekseev, V. V. Ilyushin. High-precision millimeter-wave spectrometer // *Proc. of SPIE.* – Vol. 4063. – 2000. – P. 260-263.
20. O. I. Baskakov, S. F. Dyubko, A. A. Katrich, V. V. Ilyushin, E. A. Alekseev. Millimeter-wave spectrum of CF_2Cl_2 , taking into account the hyperfine structure // *J. Mol. Spectrosc.* – 2000. – Vol. 199. – P. 26-33.
21. V. V. Ilyushin, E. A. Alekseev, S. F. Dyubko, R. A. Motiyenko, F. J. Lovas. Millimeter wave spectrum of glycine // *J. Mol. Spectrosc.* – 2005. – Vol. 231 – P. 15-22.
22. V. Ilyushin, E. A. Alekseev, J. Demaison, I. Kleiner. The ground and first excited torsional states of methyl carbamate // *J. Mol. Spectrosc.* – 2006. – Vol. 240 – P. 127-132.

Синтезатор прямого цифрового синтеза у мікрохвильовій спектроскопії

Є. А. Алексеев, В. В. Захаренко

Наведено результати дослідження можливості застосування синтезатора прямого цифрового синтезу як опорного джерела у спектрометрі міліметрового діапазону. Показано, що комбінуючи прямий цифровий синтез та вузькосмугову фазову автокорекцію частоти можна отримати високу кратність множення частоти (до 600 та вище) вихідного сигналу синтезатора прямого цифрового синтезу без впливу його побічних спектральних компонент. Розроблений синтезатор успішно застосовано у спектрометрі для дослідження обертованих спектрів молекул. Спектральна чистота вихідного сигналу оцінювалась за записами молекулярних спектрів і виявилась не гіршою, ніж із застосуванням прямого аналогового синтезу, при цьому значно зменшились розміри, маса та енергоспоживання синтезатора.

Direct Digital Synthesizer at the Microwave Spectroscopy

E. A. Alekseev and V. V. Zakharenko

The results of investigation of the possibility of application of a direct digital synthesizer (DDS) as a reference source in a millimeter-wave spectrometer are shown. It is also shown that combining the direct digital synthesis with the narrow-band phase lock loop will allow to reach a large factor of frequency multiplication (up to 600) of the DDS output signal. The new synthesizer is successfully applied as a reference source for a millimeter-wave spectrometer which is intended for investigation of rotational spectra of molecules. The spectral purity was estimated by molecular spectra records and had shown to be not worth than that of the synthesizer of direct analog synthesis. At the same time, a new synthesizer has much more smaller size, weight, and power consumption.